



Università
degli Studi di Udine
Dipartimento di Chimica
Fisica e Ambiente



M.I.U.R.
Ministero dell'Istruzione
dell'Università e della Ricerca



PLS
Piano Lauree
Scientifiche

Proposte didattiche sulla polarizzazione ottica

Percorsi e strumenti
per una didattica laboratoriale

Marisa Michelini
Alberto Stefanel



Università
degli Studi di Udine
Dipartimento di Fisica



M.I.U.R.
Ministero dell'Istruzione
dell'Università e della Ricerca



PLS
Piano Lauree
Scientifiche

Proposte didattiche sulla polarizzazione ottica

Percorsi e strumenti per una didattica laboratoriale

Il Progetto IDIFO del Piano Lauree Scientifiche è stato gestito dall'Unità di Ricerca in Didattica della Fisica dell'Università degli Studi di Udine in collaborazione con altre 20 università italiane e coordinato da Marisa Michelini. Esso ha realizzato dal 2006 al 2014, oltre a tre Master biennali per insegnanti in rete telematica, Corsi di Perfezionamento, tre Workshop per insegnanti e studenti, laboratori didattici e sperimentali per studenti, Cinque Scuole Estive Nazionali di Fisica Moderna per studenti (2007, 2009, 2011, 2013, 2014). È stato l'occasione per preparare materiali per studenti, che mettano a frutto i risultati della ricerca in didattica della fisica per l'apprendimento dei concetti più importanti della fisica dell'ultimo secolo. Questo volume raccoglie i contributi più significativi alle attività per studenti nel campo della polarizzazione ottica, in forma adatta ad essere utilizzati direttamente dai ragazzi in autonomia o in attività organizzate dagli insegnanti.

Autori

Marisa Michelini e Alberto Stefanel, *Università degli Studi di Udine*

Comitato scientifico

Benciolini Luca, *Università degli Studi di Udine*
Corvaja Pietro, *Università degli Studi di Udine*
Fedrizzi Lorenzo, *Università degli Studi di Udine*
Ferraro Speranzina, *Direzione Generale dello Studente, MIUR*
Gervasio Mario, *Università degli Studi di Udine*
Honsell Furio, *Università degli Studi di Udine*
Marcolini Lorenzo, *Sezione AIF di Udine*
Michelutti Gian Luigi, *Università degli Studi di Udine*
Mossenta Alessandra, *Università degli Studi di Udine*
Santi Lorenzo, *Università degli Studi di Udine*
Sciarratta Isidoro, *Sezione AIF di Pordenone*
Tarantino Giovanni, *ANSAS Palermo*
Tasso Carlo, *Università degli Studi di Udine*
Trovarelli Alessandro, *Università degli Studi di Udine*
Vercellati Stefano, *Università degli Studi di Udine*
Viola Rossana, *Università degli Studi di Udine*

Segreteria redazionale

Donatella Ceccolin
Zufferli Valentina

Presentazione: L'ottica fisica e la polarizzazione ottica nella didattica

Marisa Michelini, Alberto Stefanel

Fenomeni di interazione radiazione e materia sono importanti sul piano concettuale, in quanto la loro esplorazione permette di indagare la natura della luce e le proprietà ottiche dei sistemi, e sul piano applicativo, perché sono alla base di numerosi applicazioni tecnologiche rilevanti anche nella quotidianità. L'ottica fisica si presenta pertanto come un contenuto irrinunciabile del curriculum di fisica, per quanto ciò non accada nella pratica scolastica, forse a causa delle scarse risorse per l'insegnante in tale campo (Pereira et al. 1993; Bosio, Michelini, Santi 1996, 1997; Galili, Lavrik 1998; Michelini et al 2004).

La costruzione di modelli interpretativi della fenomenologia dell'ottica fisica gioca un ruolo ponte, tra l'ottica geometrica e l'elettromagnetismo classico, tra la meccanica classica e la fisica quantistica, sia in prospettiva disciplinare, sia storica (Gonzales 1993), sia didattica (Giugliarelli 1994; Bradley et al. 1999, Ghirardi et al. 1995, 1997; Pospiech 2000; Holbrow et al. 2002; Cobal, Corni, Michelini 2002; Schneider, La Puma 2002; Michelini 2001).

Numerosi sono gli ambiti in cui l'ottica fisica ha particolare rilevanza, e i nuovi campi di studio che essa ha permesso di sviluppare come ad esempio la fisica del laser e le sue diverse applicazioni, l'analisi ottica in luce polarizzata in cristallografia e scienza dei materiali. Anche in ambito biologico/naturalistico ha notevole rilevanza, ad esempio in relazione alla capacità di molti animali di riconoscere la diversa polarizzazione della luce diffusa del cielo o l'analisi di chiralità e potere rotatorio di soluzioni e sostanze.

La ricchezza, importanza e trasversalità degli ambiti di applicazione dell'ottica fisica ha consentito di sviluppare strumenti e proposte didattiche con impostazioni e obiettivi molto differenziati. Artefatti tecnologici di uso comune possono diventare essi stessi oggetto di studio (Hudoba 1996) o possono costituire la base per la realizzazione di semplici apparati sperimentali (O'Connell 1999; Moloney 1999; Beneson 2000; Chaudhry e Morris 2000; Mirò, Pitò 2001; Colin, Rodriguez 2002; Hernandez-Andres et al. 2002; Wheeler 2004). Sensori collegati in linea con l'elaboratore, in particolare di intensità luminosa, hanno consentito di aprire nuove strade per l'apprendimento/insegnamento della fenomenologia dell'interazione luce-materia (Hirata 1986; Bunch 1990; Giugliarelli et al. 1994; Michelini 1999; Ouseph 1999; Easton 2001; Hinrichsen, 2001; Chauvat et al. 2003; Grove 2003). Il loro utilizzo associato a sistemi software per la modellizzazione e simulazione (Mazzega et al. 1993) valorizza il contributo formativo sul piano sperimentale e interpretativo dell'ottica fisica (Mascellani et al. 1992; Corni et al 1993; Santi et al. 1993; Wosilait et al. 1999; Cobal et al 2002), in particolare nella prospettiva di costruire il ponte interpretativo dall'ottica geometrica a quella fisica, dal modello a propagazione rettilinea della luce della quotidianità a quello della propagazione ondulatoria della ottica fisica. Ciò è particolarmente utile in quanto tale passaggio risulta concettualmente delicato e complesso per l'apprendimento. In letteratura sono ad esempio documentati processi di ragionamento degli studenti in cui un'onda elettromagnetica è percepita come un oggetto stazionario, piuttosto che come perturbazione che si propaga (Wittman et al. 1999), si utilizzano contemporaneamente e in modo contraddittorio sia il modello ondulatorio, sia quello a propagazione rettilinea (Maurines 2002, Maurines, Romdhane 2007), ovvero in ambito quantistico si ritrova un uso incoerente dei modelli ondulatorio e particellare (Bradley et al. 1999). Numerosi sono i lavori di ricerca che documentano quanto sia resistente il modello della propagazione rettilinea a raggi della luce e quale ruolo cruciale abbia nei modelli incoerenti che gli studenti sviluppano nell'analisi ad esempio dei fenomeni di diffrazione e interferenza (Bradley et al. 1999; Maurines, Romdhane 2007). Al tempo stesso sono emersi modelli che attribuiscono a un'onda elettromagnetica, proprietà meccaniche addirittura tipiche di un oggetto rigido, come ad esempio nel passaggio di un'onda attraverso una fenditura (Maurines, de Créteil 2002) o nell'interazione di luce polarizzata con un polaroid (Bradley et al. 1999). Tali modelli non sono unicamente riferiti agli specifici processi considerati, ma incidono anche sui modi

di riconoscere e interpretazione altri processi come ad esempio quelli di emissione di luce (Mirò, Pintò 2001) e di propagazione (Wittmann 1996). Essi si sviluppano prioritariamente in conseguenza del sistematico studio dei fenomeni ottici con approccio unicamente geometrico, in cui si tiene conto solo della direzione di propagazione della luce, ma non dell'intensità della luce nella stessa propagazione libera e nell'interazione con la materia (Goldberg, Mc Dermott 1987; Galili, Lavrik 1998; Colin, Viennot 2000).

Come contributo alla formazione degli insegnanti e all'introduzione sistematica dell'ottica fisica nei curricula delle scuole superiori sono state sviluppate proposte didattiche sulla energia trasportata dalla luce, la diffrazione e l'interferenza di luce e sulla polarizzazione ottica. Tali proposte hanno approcci comuni basati sull'analisi della fenomenologia attraverso esplorazioni, che mirano al riconoscimento dei fenomeni, e misure con sensori on-line, mirate alla individuazione di leggi fenomenologiche che forniscono il supporto su cui costruire modelli interpretativi basati su principi primi.

In particolare la proposta sulla polarizzazione della luce di questo volume è stata progettata e costruita come cuscino fenomenologico a partire dal quale introdurre i concetti fondanti della meccanica quantistica.

L'approccio proposto si basa sulla costruzione operativa dei concetti attraverso l'esplorazione di situazioni problema che attivano il superamento di singoli passi concettuali. L'analisi della fenomenologia permette di riconoscere la polarizzazione come proprietà trasversale della luce. Essa viene descritta da una direzione, non da un vettore, restando comunque aperte le possibilità di completare la costruzione formale, come pure estendere la trattazione alla polarizzazione ellittica. L'approccio proposto non richiede particolari prerequisiti in merito ai contenuti e in particolare non è richiesta la conoscenza della natura elettromagnetica della luce, che costituisce invece nei testi scolastici il prerequisito fondamentale per le trattazioni della polarizzazioni della luce, spesso causa della scarsa frequentazione di questo interessante e ricco ambito fenomenologico.

Nel primo capitolo viene presentato l'approccio operativo alla polarizzazione lineare della luce su cui si basano le schede presentate nei capitoli successivi, fornendo le motivazioni di fondo, l'impostazione disciplinare scelta, il filo dei contenuti.

Nel secondo capitolo sono raccolte le schede di lavoro (tutorial), progettate per garantire il ruolo attivo degli studenti nella formulazione ed esplorazione di ipotesi sulla natura della polarizzazione come proprietà della luce riconoscibile operativamente attraverso la variazione di intensità, ma che è concettualmente distinta da essa. Ciascuna scheda-tutorial è presentata in modo sintetico e una mappa che correla in percorsi didattici l'organizzazione delle schede in sezioni. Un questionario mirato a valutare gli apprendimenti degli studenti in merito ai principali nodi concettuali del percorso conclude il secondo capitolo.

Bibliografia

- Benenson R.E. (2000) *Light Polarization Experiments with Diode Laser Pointer*, The Physics Teacher, Vol. 38, pp.44-46
- Bosio S., Michelini M. (1997) *Studio delle caratteristiche di alcune lampadine ad incandescenza*, La Fisica nella Scuola, XXX, 2 suppl., pp. 58-61
- Bosio S., Michelini M., Santi L. (1996), *From an incandescent lamp to the electrical properties of tungsten*, in Teaching the Science of Condensed Matter and New Materials, M. Michelini, S. Pugliese Jona, D Cobai eds, GIREP - ICPE Book, Forum, Udine, 1996, pp. 216- 220; S. Bosio, M. Michelini, *L'emissione di luce della lampadina da bicicletta*, La Fisica nella Scuola, XXIX, 3, 1996, pp. 154-159
- Bosio S., Michelini M., Santi L. (1999) *Da una lampadina alle proprietà elettriche del tungsteno: un tassello sperimentale per la didattica della fisica*, La Fisica nella Scuola XXXII, 4, pp. 235-241
- Bradley S.A., Shaffer P.S., Steinberg R.N., McDermott L.C. (1999) *An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference*, American Journal of Physics 67 (2) pp. 146-155
- Bunch R. M. (1990) Optical fiber sensor experiments for the undergraduate physics laboratory, Am. J. Phys. 58, 870
- Chaudhry S. and Morris P. (2000) *Optical fibres: have you seen the light?*, Phys. Educ. 35 (4), pp. 226-231
- Chauvat D., Emile O., Brunel M. and Le Floch A. (2003) *Huygens' principle and Young's experiment in the propagation of light beams*, American Journal of Physics, Vol. 71, No. 11, pp. 1196-1198
- Cobal M., Corni F., Michelini M. (2002a) Thinking on vectors and formal description of the light polarization for a new educational approach, in *Developing Formal Thinking in Physics*, Michelini M, Cobal M eds, Udine 2001, Girep book with selected papers, Forum, Udine
- Cobal M., Corni F., Michelini M, Santi L., Stefanel A (2002 b) *A resource environment to learn optical polarization*, in *Physics in new fields*, Girep International Conference proceedings, Lund
- Colin D. and Rodriguez J. (2002) *A simple medical physics experiment based on a laser pointer*, Am. J. Phys. 7, pp. 1068
- Colin P and Viennot L (2001) Using two models in optics: Students' difficulties and suggestions for teaching Am. J. Phys. 69 S36-44
- Corni F., Mascellani V., Mazzega E., Michelini M., Ottaviani G. (1993) *A simple on-line system employed in diffraction experiments*, in Light and Information, in Light and Information, L C Pereira, J A Ferreira, H A Lopes Editors, Girep book, Univ. do Minho, Braga, pp. 381-388
- Easton D. (2001) *Transmission through Crossed Polaroid Filters*, The Physics Teacher, Vol. 39, pp. 231-233
- Galili I, Lavrik V. (1998) Flux Concept in Learning about Light: A Critique of the Present Situation
- Ghirardi G. C., Grassi R., Michelini M. (1995) *A Fundamental Concept in Quantum Theory: The superposition Principle*, in Thinking Physics for Teaching, in Bernardini C, Tarsitani C and Vicentini eds, Plenum Press, New York, p. 329
- Ghirardi G. C., Grassi R., Michelini M. (1997) *Introduzione delle idee della fisica quantistica e il ruolo del principio di sovrapposizione lineare*, LFNS, XXX, 3 Supplemento, Q7, pp. 46-57
- Giugliarelli G., Michelini M., Michelutti G. L., Santi L.(1994) *Tecnologie moderne e progettualità nell'attività sperimentale per favorire i processi di apprendimento*, in Strategie di insegnamento della fisica: il ruolo del problema e il ruolo del laboratorio, La Fisica nella Scuola, XXVII, 4 Suppl. Spec., p. 113-135
- Gonzales A. M. (1993) *Light stories: a brief history of light*, in Light and Information L C Pereira, J A Ferreira, H A Lopes Editors, Girep book, Univ. do Minho, Braga
- Hernández-Andrés J., Valero E. M., Nieves J. L., Romero J. (2002) *Fizeau fringes at home*, American Journal of Physics, Vol. 70, No. 7, pp. 684-688
- Hinrichsen P. F. (2001) *Apparatus and demonstration notes*, Am. J. Phys. 69 (8) 2001, pp. 917-919
- Hirata K. (1998) *How can we use microcomputers effectively in teaching and learning physics?*, Communicating Physics, ICPE (IUPAP), pag. 132
- Grove T. T., (2002) *A low-cost scanning Fabry--Perot cavity for laser experiments*, Am. J. Phys. 71, 2003, p. 184
- Holbrow C. H., Galvez E., Parks M. E. (2002) *Photon Quantum mechanics and beam splitters*, American Journal of Physics, 70 (3), pp. 260-265
- Hudoba G. (1996) The physics of the compact disc, in *Teaching the Science of Condensed Matter and New Materials*, M. Michelini, S Pugliese Jona, D. Cobai eds, GIREP-ICPE Book, Forum, Udine, p. 213-216
- Mascellani V., Mazzega E., Michelini M. (1992) *Un sistema per esperienza di ottica on-line e indicazioni per attività didattiche nello studio della diffrazione ottica*, LFNS, XXV, 1 – Speciale, pp. 132-147
- Mascellani V., Mazzega E., Michelini M. (1988) *L'elaboratore on-line per lo studio di figure di diffrazione ottica*, Ricerche in Didattica della Fisica, Atti del VII Convegno Nazionale GNDF, Pavia, pag. 251

- Maurines L., Romdhane I. (2007) Les étudiants et les interférences lumineuses: cohérence des sources et principe de superposition, *Didaskalia*, 31, 85
- Maurines L. (2000) Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent Students, *Didaskalia*, (0), 17
- Maurines L., de Créteil M. (2002) Spontaneous reasoning on light diffraction and coherent illumination optical imaging, *Esera Duisburg*
- Michelini M. (2001) Supporting scientific knowledge by structures and curricula which integrate research into teaching, in *Physics Teacher Education Beyond 2000* (Phytec2000), R. Pinto, S. Surinach Eds., Girep book - Selected contributions of the Phytec2000 International Conference, Elsevier, Paris, p. 77-81
- Michelini M., Michelutti G. L., Stefanel A., Santi L. (2004) *Teacher formation strategies on physical optics: experimenting the proposal on diffraction*, in *Quality Development in the Teacher Education and Training*, M. Michelini ed., Girep book of selected papers, Forum, Udine
- Mirò C., Pintò R. (2001) *Light production. Categorization of written explanations based on reasoning patterns*, in *Research in Science Education in Europe: the picture expands*, M. Bandiera, et al. eds, Roma, pp. 179-187
- Moloney M. J. (1999) *Homemade Interference*, *The Physics Teacher*, Vol. 37, pp. 504-505
- O'Connell J. (1999) *Optics Experiments Using a Laser Pointer*, *The Physics Teacher*, Vol. 37, pp. 445-446
- Ouseph P. J., Driver K., Conklin J. (2001) *Polarization of light by reflection and the Brewster angle*, *American Journal of Physics*, 69 (11), pp. 1166-1168
- Pereira L. C., Ferreira J. A., Lopes H. A. eds (1993) *Light and Information*, *Girep book*, Univ. do Minho, Braga.
- Pospiech G. (2000) *Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics*, *Phys. Educ.* 35 (6), pp. 393-399
- Romdhane I. (2010) La coherence de la lumiere et les interférences lumineuses: raisonnements des étudiants et difficultés d'ordre historique, doctoral thesis
- Santi L., Mazzega E., Michelini M. (1993) Understand radiation Interference by means of computer modelling, *GIREP Book Light and Information*, L C Pereira, J A Ferreira, H A Lopes, Univ. do Minho, Braga, pp. 372-380
- Schneider M. B., LaPuma I. A. (2002) *A simple experiment for discussion of quantum interference and which-way measurement*, *Am. J. Phys.* 70 (3), pp. 266-271
- Wheeler C. R., Henriksen P. N., Ramsier R. D. (2004) *Visibility of thin-film interference fringes*, *American Journal of Physics* - February 2004 - Volume 72, Issue 2, pp. 279-281
- Wittmann M.C., Steinberg R.N., Redish E.F. (1999), *Making sense of how students make sense of mechanical waves*, *Physics Teacher*, 37, 15-21
- Wosilait K., Heron P. R. L., Shaffer P. S., McDermott C.L. (1999) *Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light*, *Phys. Educ. Res. Am. J. Phys. Suppl.* 67 (7) pp. S5-S15

Indice

Presentazione: L'ottica fisica e la polarizzazione ottica nella didattica	pag.	3
<i>Marisa Michellini, Alberto Stefanel</i>		

Capitolo 1. Approccio fenomenologico alla polarizzazione ottica

1.1 Percorso di esplorazione sperimentale della polarizzazione	»	9
Obiettivi generali	»	9
Motivazioni e scelte rispetto al quadro concettuale	»	9
Impostazione (percorso concettuale)	»	10
1.2 Il filo del percorso e i suoi contenuti	»	11
1.2.1 Dalla trasmissione della luce alla introduzione operativa della polarizzazione	»	11
1.2.2 La polarizzazione nei fenomeni quotidiani	»	13
1.2.3 La polarizzazione come proprietà non-scalare della luce	»	15
1.2.4 La polarizzazione come proprietà trasversale della luce	»	17
1.2.5 Il ruolo attivo del polaroid	»	20
1.2.6 Riepilogo delle osservazioni qualitative sulla polarizzazione	»	21
1.2.7 Le leggi fenomenologiche della polarizzazione: La legge di Malus e di trasmissione		22
1.2.8 Rappresentazione della polarizzazione e dell'intensità	»	23
1.2.9 Interazione della luce con cristalli birifrangenti	»	24
1.2.10 Polarizzazione per riflessione e per rifrazione	»	29
1.2.11 Polarizzazione per diffusione	»	31
1.2.12 Applicazioni della polarizzazione	»	31

Capitolo 2. Strumenti operativi per una didattica laboratoriale sulla polarizzazione ottica

2.1 Le sezioni in cui si articola il percorso di polarizzazione ottica	»	33
Sezione A - Esplorazione iniziale	»	33
Sezione B - Le leggi Fenomenologiche	»	34
Sezioni C - Birifrangenza e polarizzazione	»	34
Sezione D - Polarizzazione per riflessione e rifrazione	»	35
Sezione E - Polarizzazione per diffusione	»	36
Sezione F - Semplici applicazioni della polarizzazione	»	36
2.2 Mappa delle schede nel percorso di esplorazione della polarizzazione ottica	»	37
Scheda 01 - PolLav - Produrre/Analizzare luce polarizzata con polaroid sulla lavagna luminosa.	»	38
Scheda 02 - FormA - Rappresentazione della polarizzazione	»	44
Scheda 03 - Quot - La polarizzazione nei fenomeni quotidiani	»	46
Scheda 04 - PolRiepilogo - Riepilogo sulla esplorazione della polarizzazione	»	51
Scheda 05 - PolMalus1- La legge di Malus con luce polarizzata	»	53
Scheda 06 - PolMalus2- La legge di Malus con luce non polarizzata	»	57
Scheda 07 - PolMalusForm - Dalla legge di Malus alla rappresentazione formale della polarizzazione della luce	»	62
Scheda 08 - BR1.1 Birifrangenza con un cristallo sul libro	»	64
Scheda 09 - BR1.2 La polarizzazione delle immagini prodotte dal cristallo di calcite sul foglio	»	65
Scheda 10 - BR1.3 Polarizzazione per birifrangenza e simmetria del cristallo.	»	68
Scheda 11 - BR1.4 - Birifrangenza di luce polarizzata con il cristallo sul foglio	»	71
Scheda 12 - BR1.5 - L'interazione di luce laser con un cristallo birifrangente.	»	77

Scheda 13 - BR1.6 - La propagazione di un solo fascio in un cristallo birifrangente	»	79
Scheda 14 - BR1.7 - Domande per casa sull'interazione di luce con un cristallo birifrangente	»	81
Scheda 15 - BR2.1 - L'interazione di luce con due cristalli paralleli	»	82
Scheda 16 - BR2.2 - L'interazione di luce con due cristalli a 45°	»	84
Scheda 17 - BR2.3 - L'interazione di luce con due cristalli inversi	»	86
Scheda 18 - PolRifle1: La polarizzazione per riflessione della luce	»	88
Scheda 19 - PolRifle2 - Riflessione di luce polarizzata	»	92
Scheda 20 - PolRifra - La polarizzazione per rifrazione della luce	»	97
Scheda 21 - PolTras1 – Trasmissività di filtri rifrangenti	»	101
Scheda 22 - PolTras2 – Trasmissività di filtri polaroid	»	107
Scheda 23 - PolBrewster – Misura dell'angolo di Brewster	»	112
Scheda 24 - PolDif1 - La polarizzazione per diffusione della luce	»	116
Scheda 25 - PolDif2 - Diffusione di luce polarizzata	»	120
Scheda 26 - Cristal - L'analisi di un cristallo/minerale con luce polarizzata	»	124
Scheda 27 - Sforzi - L'analisi degli sforzi in luce polarizzata	»	128
Scheda 28 - PotRot – Mezzi otticamente attivi	»	130
Questionario sulla polarizzazione	»	136

Capitolo 1.

Approccio fenomenologico alla polarizzazione ottica

Marisa Michelini, Alberto Stefanel

Unità di Ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Udine

1.1 Percorso di esplorazione sperimentale della polarizzazione

Illustriamo in questa sede il percorso didattico sulla polarizzazione ottica condotto in diverse (28) sperimentazioni di ricerca negli anni 2006-2014. Obiettivi, motivazioni, impostazione della scelta laboratoriale fatta precedono la dettagliata descrizione del filo del percorso, qui presentato in forma di regia.

Obiettivi generali

Ci si propone di costruire operativamente il concetto di polarizzazione come proprietà trasversale della luce, distinta dalla sua intensità. La polarizzazione viene descritta formalmente con una rappresentazione vettoriale, che consente di rendere conto delle principali leggi fenomenologiche che caratterizzano le interazioni luce-materia considerate.

Motivazioni e scelte rispetto al quadro concettuale

La polarizzazione è una proprietà della luce che entra in gioco in tutte le principali fenomenologie dell'interazione luce-materia: la riflessione, la rifrazione e trasmissione di luce, la diffusione. Gioca un ruolo importante in quadri interpretativi completamente diversi come quello delle onde classiche, quando si tratta la luce come onda elettromagnetica, o quello quantistico dei fotoni, quando si considera la natura fotonica della luce. Ha rilevanza per diverse applicazioni pratiche, come ad esempio: nell'analisi in luce polarizzata di minerali e cristalli; nella costruzione di mappe di stress superficiali di oggetti trasparenti o di oggetti opachi, ricoperti con film di sostanze otticamente attive, sottoposti a sollecitazioni esterne; nell'analisi di soluzioni zuccherine ovvero nell'identificazione di particolari sostanze organiche in una soluzione e nella stima della loro concentrazione.

È alla base di oggetti di uso quotidiano come gli schermi LCD dei PC, gli occhiali Polaroid, i filtri polarizzatori da fotografo, i laser, dei quali la monocromaticità della luce prodotta è strettamente correlata alla sua caratteristica di essere anche polarizzata.

La gran parte degli uccelli e dei pesci migratori e molti insetti hanno occhi sensibili alla polarizzazione della luce e sono in grado di orientarsi in base alla diversa polarizzazione della luce solare diffusa.

La rilevanza della polarizzazione della luce, sia nell'ambito della fisica, sia in altri ambiti scientifici, ne motiva la trattazione anche nella scuola superiore, con un ruolo non marginale come invece viene fatto usualmente nei testi e nei corsi scolastici.

Nella proposta qui presentata si vuole in particolare focalizzare sulla introduzione operativa della polarizzazione ottica lineare, utilizzando filtri polarizzatori, dandone una descrizione formale con una rappresentazione vettoriale, interpretabile successivamente in contesti diversi. L'esplorazione di diversi contesti in cui la luce viene polarizzata, oltre ad offrire un panorama fenomenologico piuttosto ampio già di per sé interessante ne fa riconoscere anche il carattere unitario. Tale carattere unitario trova traduzione nella graduale introduzione della rappresentazione vettoriale della polarizzazione, come semplice rappresentazione iconica prima, e rappresentazione formalizzata poi in grado di rendere conto della fenomenologia, quando è stata costruita sperimentalmente la legge di Malus. La costruzione di tale rappresentazione emerge, quindi, dalla fenomenologia e non presuppone un quadro teorico di riferimento a priori. Prepara, piuttosto, il terreno all'interpretazione della polarizzazione, lasciando aperta la possibilità di trattarla come proprietà legata al piano di vibrazione del campo elettrico di un'onda elettromagnetica, così come proprietà dinamica che caratterizza lo stato dei fotoni.

La limitazione ai fenomeni in cui è coinvolta solo la polarizzazione lineare, può essere facilmente superata includendo, negli stessi contesti qui considerati, anche esplorazioni sulla polarizzazione ellittica.

Nell'approccio scelto, si motiva l'analisi della polarizzazione richiamando il suo ruolo in oggetti tecnologici comuni, come gli occhiali polaroid o i puntatori laser, o in applicazioni tecnologiche della polarizzazione, come quelle soprarichiamate, di cui è oramai facile anche trovare buone documentazioni fotografiche ed esplicative in rete. Si inserisce l'approccio alla polarizzazione nel contesto della trasmissione di luce attraverso materiali rifrangenti. Prevede inoltre l'analisi dei processi quotidiani di interazione della luce con la materia (riflessione, rifrazione, diffusione, birifrazione) per riconoscere il ruolo che in essi ha la polarizzazione, e quella della polarizzazione della luce prodotta da diverse sorgenti. Offre infine diversi agganci all'applicazione della luce polarizzata in altri ambiti come quello della cristallografia e mineralogia o quello dell'analisi degli sforzi o delle soluzioni zuccherine, partendo dalla situazione base di due polaroid incrociati tra i quali si dispongono cristalli, minerali, oggetti di materiali plastici trasparenti sottoposti a sforzi, soluzioni zuccherine. Si sviluppa secondo il filo di semplici esplorazioni sperimentali descritto nel seguito. Viene proposto con ventotto schede basate sull'inquiry method attivando il ciclo PEC, organizzate in cluster per un loro utilizzo modulare, come illustrato nella scheda di sintesi proposta nel paragrafo 4.1.2. La parte più ampia del percorso riguarda l'interazione di luce con polaroid e cristalli birifrangenti, in cui si approfondiscono situazioni, che costituiscono il riferimento per lo sviluppo del percorso sulla meccanica quantistica.

Impostazione (percorso concettuale)

Il riconoscimento operativo della polarizzazione viene avviato a partire dal contesto dell'analisi di luce trasmessa da più lamine di diversi materiali: lamine rifrangenti ialine; lamine rifrangenti bruno; lamine traslucide; cristalli trasparenti e traslucidi; cristalli birifrangenti, polaroid.

La luce prodotta da una lavagna luminosa viene osservata traguardando attraverso uno o più polaroid. Si riconosce operativamente la polarizzazione come quella proprietà acquisita dalla luce nell'attraversare il primo polaroid (polarizzatore) e analizzata ruotando il secondo polaroid (analizzatore) intorno alla direzione di propagazione della luce. Essa si riconosce quindi dalla variazione di intensità luminosa trasmessa dall'analizzatore, ma va distinta dall'intensità della luce. Tale definizione operativa viene messa alla prova nell'esplorazione di situazioni quotidiane, per riconoscere le principali modalità di polarizzare la luce.

Si riconosce la luce polarizzata nelle situazioni comuni: la luce riflessa da una lastra di vetro, una finestra, un pavimento lucido, il parabrezza di un'auto; la luce trasmessa da più lamine rifrangenti; la luce diffusa da una soluzione intorbidata; la luce diffusa del cielo; la luce trasmessa da un cristallo birifrangente, la luce emessa da un puntatore laser; la luce trasmessa da diversi materiali plastici. Si riconosce inoltre che la luce delle normali lampade a incandescenza o dei tubi a neon non è polarizzata.

La geometria dei polaroid suggerisce da un lato la trasversalità della polarizzazione rispetto alla direzione di propagazione della luce e dall'altro la sua natura vettoriale. Può essere infatti rappresentata con un vettore parallelo al piano di un polaroid e che ne individua una direzione privilegiata (direzione di polarizzazione).

La prima esplorazione qualitativa motiva alla ricerca delle leggi che descrivono la polarizzazione della luce. La misura con sensori on-line della intensità I della luce trasmessa da due polaroid in funzione dell'angolo θ formato da due fissate direzioni su di essi porta a riconoscere che essa varia linearmente con $\cos^2\theta$. In particolare si riconosce, che nel caso della luce laser vi è diretta proporzionalità tra I e $\cos^2\theta$ (legge di Malus), mentre nel caso di luce bianca sussiste solo una relazione lineare tra le due grandezze. Tale differenza sono una conseguenza della diversa efficienza del polaroid nel polarizzare la luce di frequenze (colori) diverse, come è semplice riconoscere sperimentalmente. Lo studio della trasmissività di una lamina rifrangente fornisce gli elementi per discutere le modalità con cui la luce interagisce con la materia, non solo quando viene da essa assorbita, ma anche quando ne viene trasmessa o riflessa. La trasmissione della luce attraverso i polaroid si può caratterizzare: da un lato con un coefficiente di trasmissione legato a tutti quei fenomeni (prioritariamente riflessione sulla prima superficie su cui incide la luce, diffusione a causa delle imperfezioni, assorbimento), che

concorrono in misura diversa ad attenuare la luce trasmessa, come per un normale filtro rifrangente; dall'altro bisogna tener conto del fatto che essi sono prioritariamente filtri attivi, in quanto polarizzano la luce che li attraversa secondo la direzione di polarizzazione.

Si arriva alla legge fenomenologica:

$$I = I_0 T \cos^2 \alpha$$

che in modo semplice e compatto caratterizza il comportamento della luce polarizzata nell'attraversare un polaroid reale.

Essa entra in gioco nella descrizione di tutta la fenomenologia della polarizzazione (almeno fino a che ci si limita alla polarizzazione lineare), ossia nei diversi modi di produrre luce polarizzata (riflessione, rifrazione, diffusione, birifrangenza). Evidenzia l'unitarietà dei fenomeni di polarizzazione ed è intrinsecamente connessa alla natura vettoriale trasversale della polarizzazione.

L'analisi quantitativa della luce riflessa da superfici rifrangenti consente di misurare l'angolo di Brewster e riconoscimento la legge di Brewster. Lo studio quantitativo può essere esteso anche all'analisi della luce trasmessa da una soluzione zuccherina per valutare il suo potere rotatorio.

Diversi gradi di formalizzazione sono previsti. Il primo consiste nel caratterizzare lo stato di polarizzazione della luce con una freccia che pur non avendo ancora i caratteri formali di un vettore costituisce un potente mezzo di rappresentazione. Il passo successivo è quello di riconoscere che la descrizione vettoriale dello stato di polarizzazione è sufficiente per riprodurre la fenomenologia (la legge di Malus). Il terzo livello di formalizzazione, qui solo accennato, prevede la descrizione della polarizzazione con un versore a cui è associata una fase.

La rappresentazione vettoriale lascia aperta la possibilità di correlare l'intensità alla lunghezza del vettore che rappresenta la polarizzazione, ovvero ad un numero opportuno di versori uguali fra loro.

La rilettura dei fenomeni indagati in termini di processi di interazione di singoli fotoni con la materia avvia alla rilettura della legge di Malus in termini probabilistici e alla costruzione del concetto di stato quantico di un fotone.

1.2 Il filo del percorso e i suoi contenuti¹

1.2.1 Dalla trasmissione della luce alla introduzione operativa della polarizzazione

Nella vita quotidiana sono comuni situazioni in cui si ha a che fare con luce polarizzata: la luce riflessa da un vetro, la luce di un fascio laser, la luce trasmessa dai filtri polarizzatori (Polaroid), abbastanza diffusi e usati per gli occhiali da sole, le lenti antiriflesso delle macchine fotografiche, le pellicole antiriflesso dei parabrezza delle auto.

Diverse applicazioni tecnologiche, che facilmente si possono ritrovare in rete, impiegano luce polarizzata.

Se probabilmente la parola Polaroid è di uso comune, sicuramente è meno comune la conoscenza di come un Polaroid opera sulla luce, ovvero di quali proprietà le fa acquisire e come questa proprietà entri in gioco nell'interazione con la materia.

Ci si può chiedere allora: Quali aspetti caratterizzano la luce polarizzata? Come si produce luce polarizzata? Come si riconosce se la luce è polarizzata?

Per rispondere a queste domande si può considerare il contesto sicuramente familiare in cui un fascio di luce, come ad esempio quello proveniente da una finestra o prodotto da una lampada a filamento o da una lavagna luminosa, incide su una o più lamine rifrangenti (es.: lastre di vetro o plexiglas, fogli di acetato da lucido).

Si riconosce in tutti i casi che la luce trasmessa ha intensità tanto minore, quanto maggiore è il numero di lamine sovrapposte. Una normale lamina rifrangente, per quello che riguarda la trasmissione di

⁽¹⁾ La discussione del filo sulla polarizzazione sviluppa la scheda sintetica proposta in occasione del WS3 e della Scuola Estiva di Fisica Moderna 2007.

luce, si comporta quindi come un filtro che attenua parzialmente la luce che incide su di esso². Con una osservazione ad occhio nudo è facile distinguere anche piccole attenuazioni della luce, essendo il nostro occhio particolarmente sensibile anche a piccole variazioni o differenze percentuali di intensità luminosa (~5%). Si possono ripetere osservazioni analoghe utilizzando dei filtri polaroid uguali di forma rettangolare ottenuti ritagliandoli da uno stesso foglio in modo tale che il lato più lungo sia per tutti nello stesso verso del foglio di partenza. D'ora in poi si suppone di operare sempre con polaroid uguali opportunamente ricavati nel modo descritto.

Se si riguarda, attraverso un polaroid (o un altro polarizzatore come una lamina di cristallo di tormalina) una sorgente luminosa o la luce di una lavagna luminosa, si riconosce una certa attenuazione della luce. Tale attenuazione è indipendente dalla orientazione del polaroid ossia non cambia se si ruota il polaroid intorno alla direzione di propagazione della luce (fig. 1). Rispetto al caso dei filtri rifrangenti si potrà osservare una maggiore o minore attenuazione della luce trasmessa a seconda dei filtri utilizzati.

Con più polaroid sovrapposti l'intensità della luce trasmessa è via via minore quanto maggiore è il numero di polaroid utilizzati (fig. 2). Se i polaroid vengono ruotati solidalmente l'intensità della luce trasmessa non cambia (fig. 3).

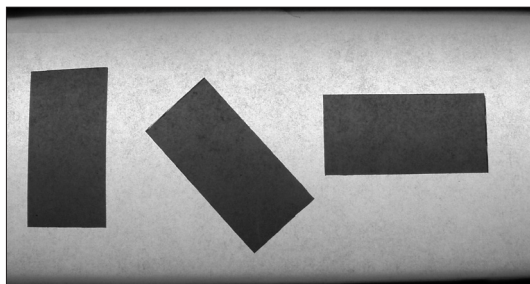


Fig. 1. Polaroid sulla lavagna luminosa disposti secondo orientazioni diverse.

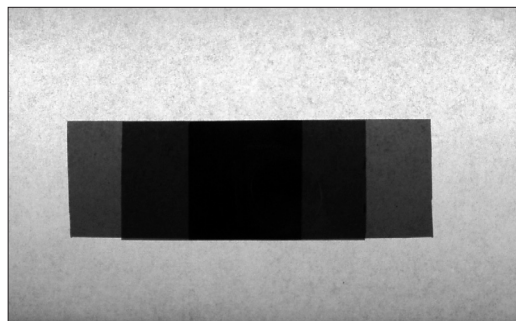


Fig. 2. Tre polaroid parzialmente sovrapposti. L'intensità della luce trasmessa decresce tanto maggiore è il numero di polaroid sovrapposti.

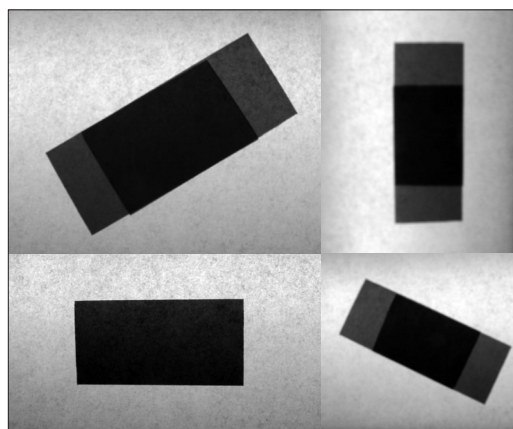


Figura 3. Due polaroid sovrapposti ruotati solidalmente sulla lavagna luminosa

Analogamente non cambia l'intensità della luce trasmessa se si riguarda una sorgente di luce attraverso due polaroid sovrapposti e distanti di qualche centimetro, che vengono allontanati uno dall'altro nella direzione di propagazione della luce.

Il comportamento dei polaroid è, in queste prime osservazioni, analogo a quello di normali lamine rifrangenti.

⁽²⁾ La minore intensità della luce trasmessa rispetto a quella della luce incidente è dovuta al fatto che la luce incidente viene parzialmente riflessa, diffusa per riflessione e per trasmissione, assorbita dal mezzo attraversato.

L'aspetto che li differenzia dai normali filtri rifrangenti si riconosce quando, presi due polaroid sovrapposti, si ruota uno rispetto all'altro intorno alla direzione da cui proviene la luce. L'intensità della luce trasmessa dal secondo polaroid varia al variare dell'angolo formato con l'altro polaroid, passando da un massimo, per una definita orientazione per cui diremo che i polaroid sono paralleli, a un minimo, quando si ruota di 90° per esempio il secondo polaroid intorno alla direzione della luce osservata, quando diremo che i polaroid sono incrociati (fig. 4).

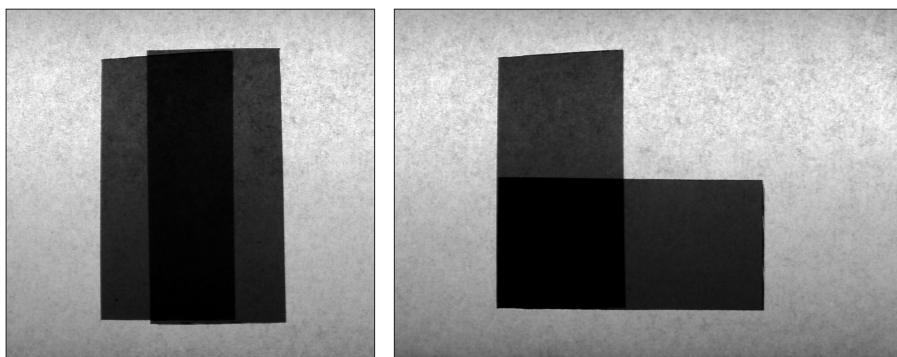


Fig. 4. Due polaroid sovrapposti: paralleli, a sinistra; incrociati, a destra.

La luce trasmessa dal primo polaroid ha acquistato una proprietà, che si chiama polarizzazione, che viene rilevata osservando una variazione di intensità della luce trasmessa dal secondo polaroid quando questo viene ruotato intorno alla direzione di propagazione della luce. Il primo polaroid quindi polarizza la luce, per questo può essere conveniente chiamarlo polarizzatore, il secondo polaroid analizza la polarizzazione della luce trasmessa dal primo, per questo può esser conveniente chiamarlo analizzatore. Un polaroid quindi è un oggetto che può essere utilizzato sia per produrre luce polarizzata sia per analizzare l'eventuale polarizzazione della luce osservata.

Si può allora definire operativamente la polarizzazione come proprietà della luce, dicendo che:

- la luce proveniente da una sorgente (primaria o secondaria che sia) è polarizzata se si rileva una variazione dell'intensità luminosa, quando la si osserva attraverso un analizzatore, che viene ruotato intorno alla direzione di propagazione della luce.

La luce trasmessa da un polaroid è polarizzata, in quanto, se osservata attraverso un analizzatore, manifesta una diversa intensità a seconda di come si orienta l'analizzatore (fig. 4). La luce della lavagna luminosa non risulta polarizzata, infatti, se osservata attraverso un analizzatore, viene trasmessa sempre con la stessa intensità indipendentemente da come viene ruotato l'analizzatore (fig. 1).

1.2.2 La polarizzazione nei fenomeni quotidiani

Per valutare se la definizione operativa di polarizzazione che è stata data è sufficientemente generale e per scoprire se vi sono altri processi, oltre al filtraggio con polaroid, in cui si produce luce polarizzata, si effettua una preliminare esplorazione del ruolo della polarizzazione nei fenomeni di interazione luce materia con cui quotidianamente si ha a che fare.

Con un polaroid, usato come analizzatore, si intercetta la luce proveniente da diverse sorgenti primarie o secondarie.

Se si punta l'analizzatore verso l'azzurro del cielo e lo si ruota intorno alla direzione da cui proviene la luce, si rileva una variazione di intensità (fig. 5). Si scopre quindi che l'azzurro del cielo è dovuto a luce diffusa che è almeno parzialmente polarizzata. Si parla di polarizzazione parziale perché quando si ruota l'analizzatore intorno alla direzione da cui proviene la luce, l'intensità della luce da esso trasmessa cambia, ma non diventa mai nulla. Il massimo grado di polarizzazione, ossia il maggiore contrasto tra massimo e minimo, si ha quando si osserva la luce solare diffusa a 90° rispetto alla dire-

zione in cui si trova il sole, ovvero rispetto alla direzione di provenienza della luce solare. Non risulta polarizzata, invece, la luce diffusa nella stessa direzione della luce proveniente direttamente dal sole (ATTENZIONE: non osservare la luce solare direttamente, ma proiettarla sempre su uno schermo, anche osservandola attraverso i polaroid), sia in avanti, nello stesso verso della luce del sole, sia retro diffusa.

Analogamente si osserva che è parzialmente polarizzata la luce riflessa da una finestra o da un pavimento lucido ad un angolo prossimo a 60° (fig. 6), oppure quella trasmessa da una spessa lastra di vetro per incidenza obliqua (in questo caso il grado di polarizzazione è molto basso).



Figura 5. La luce del cielo osservata in direzione perpendicolare a quella da cui provengono i raggi del sole.



Fig. 6. Osservazione della luce polarizzata per riflessione da un pavimento lucido e da una finestra.

Se si compiono le analoghe esplorazioni con la luce prodotta da una normale lampada a filamento, la luce riflessa da un normale specchio da bagno (fig. 7), la luce diretta del sole (ATTENZIONE: non osservare mai direttamente la luce del sole neppure attraverso un solo polaroid), non si osservano apprezzabili variazioni dell'intensità della luce trasmessa dal polaroid. In questi casi quindi non si ha a che fare con luce polarizzata

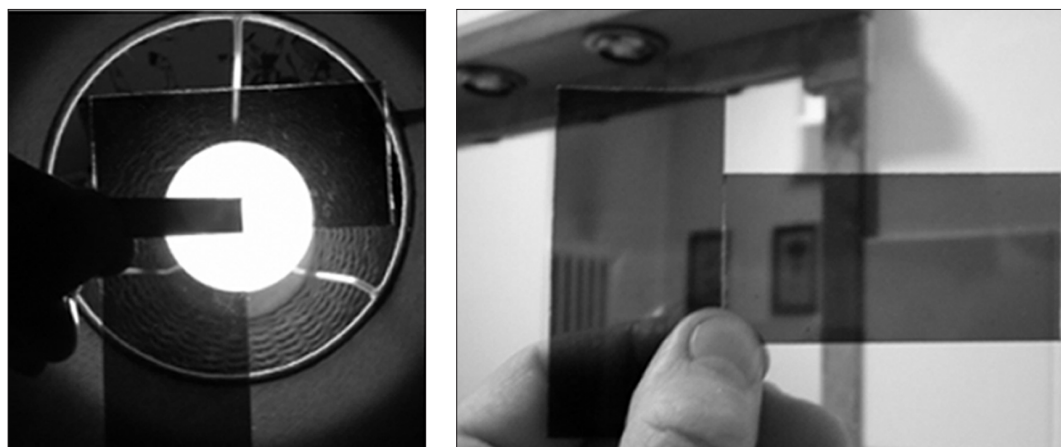


Fig.7. La luce prodotta da una lampada a filamento e la luce riflessa da un normale specchio argentato da bagno viene trasmessa nello stesso modo dai polaroid, indipendentemente dalla orientazione dei polaroid stessi. Non sono quindi polarizzate.

Si può invece riconoscere che la luce emessa da un puntatore laser è fortemente polarizzata (fig.8). Come pure si può facilmente scoprire che la luce trasmessa dai bei cristalli di calcite tipo spato d'Islanda oltre ad essere sorprendentemente rifratta secondo due diverse direzioni distinte è pure completamente polarizzata (fig. 9).

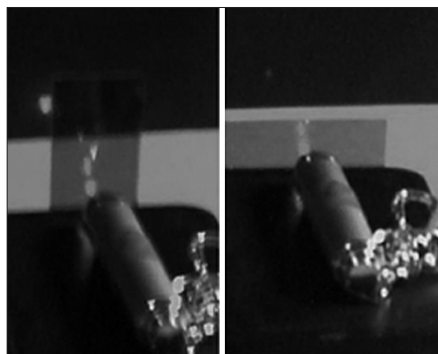


Fig. 8. La luce di un puntatore laser analizzata con un polaroid.

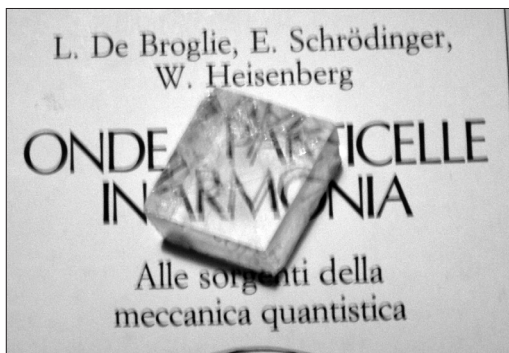


Fig. 9. La doppia rifrazione con un cristallo di calcite tipo spato d'Islanda.

Dagli esiti dell'esplorazione effettuata si può concludere che:

- la definizione operativa di polarizzazione che è stata data in precedenza è sufficientemente generale, avendo permesso di scoprire i processi in cui la luce viene polarizzata e quelli in cui invece non si ha luce polarizzata;
 - in molti fenomeni della vita quotidiana (riflessione e trasmissione da una lamina rifrangente, trasmissione da un cristallo birifrangente, diffusione), almeno per particolari situazioni, la luce risulta totalmente o parzialmente polarizzata;
 - esistono inoltre delle sorgenti, come ad esempio i puntatori laser, che producono luce polarizzata.
- La semplicità operativa dell'esplorazione con i polaroid motiva ad approfondire, sia sul piano qualitativo, sia su quello quantitativo, il contesto della luce che interagisce con polaroid.

1.2.3 La polarizzazione come proprietà non-scalare della luce.

I filtri polaroid, come i normali filtri rifrangenti, attenuano parzialmente la luce che li attraversa. A differenza dei filtri ordinari, i polaroid agiscono sulla luce anche facendogli acquistare la proprietà, che si chiama polarizzazione. Tale proprietà si riconosce tramite una variazione di intensità luminosa, ma è distinta da essa. Abbiamo bisogno di un polaroid analizzatore per evidenziare la polarizzazione della luce in quanto l'occhio umano non rileva la polarizzazione, essendo sensibile solo all'intensità luminosa³.

Il comportamento di un polaroid è pertanto analogo a quello dei normali filtri rifrangenti quando la luce che incide su di esso è non-polarizzata, mentre risulta molto diverso quando la luce che incide su di esso è polarizzata, come quella trasmessa da un primo polaroid.

Se si osserva la luce trasmessa da due polaroid, per una rotazione di uno di essi di 360° , si rileva una variazione periodica dell'intensità della luce trasmessa, da un massimo a un minimo per una rotazione di 90° di un polaroid rispetto all'altro. Si osservano due posizioni in cui si ha un massimo di trasmissione (si passa da una all'altra con una rotazione di 180°) e due posizioni in cui si ha un minimo (si passa dall'una all'altra con una rotazione di 180°).

⁽³⁾ Le osservazioni proposte sono effettuate in luce bianca e quindi quanto si sta discutendo non dipende essenzialmente dal colore della luce, né dalla capacità dell'occhio umano di distinguere i colori.

In particolare se si fissa la direzione del polarizzatore rispetto a un sistema di riferimento, è necessario orientare lungo una fissata direzione il polaroid analizzatore per ottenere un massimo (o un minimo) di trasmissione. Se, a partire da questa situazione si ruota di un angolo α il polarizzatore intorno alla direzione della luce osservata è necessario ruotare anche l'analizzatore dello stesso angolo α per riottenere un massimo (minimo) di trasmissione.

Il fatto che ci sia una ben definita direzione in cui si deve orientare l'analizzatore per ottenere un massimo di trasmissione suggerisce che, fissata l'orientazione del primo polaroid rispetto a un fissato sistema di riferimento, vi sia una direzione privilegiata in cui il polarizzatore polarizza la luce e al tempo stesso che la luce da esso trasmessa sia polarizzata secondo una ben definita direzione trasversale rispetto alla direzione di propagazione.

Ci si può convincere di ciò utilizzando i polaroid rettangolari uguali, ritagliati dall'unico foglio tutti con i lati più lunghi paralleli fra loro. Posto un primo polaroid sopra al piano di una lavagna luminosa è necessario disporre un secondo polaroid con il lato più lungo parallelo a quello del primo polaroid. Un terzo polaroid dovrà essere disposto anch'esso con il lato più lungo parallelo a quelli dei primi due e così via (fig. 10 in cui è rappresentata una situazione analoga di quella riprodotta nella foto di fig. 2). Tutti i polaroid polarizzano la luce nello stesso modo, in quanto l'analizzatore (ossia l'ultimo polaroid disposto) va sempre posto parallelamente rispetto agli altri due.

Se si assume, almeno provvisoriamente, che la direzione privilegiata, che d'ora in poi chiameremo direzione di polarizzazione, sia lungo il lato più lungo per il primo polaroid, la direzione di polarizzazione di tutti gli altri polaroid sarà parallela al loro lato più lungo. È importante sottolineare che tale scelta, in parte arbitraria, in ogni caso permette di definire univocamente la direzione di polarizzazione di un qualsiasi polaroid, indipendentemente dal fatto che sia stato ricavato dallo stesso foglio del primo e dalla loro forma.

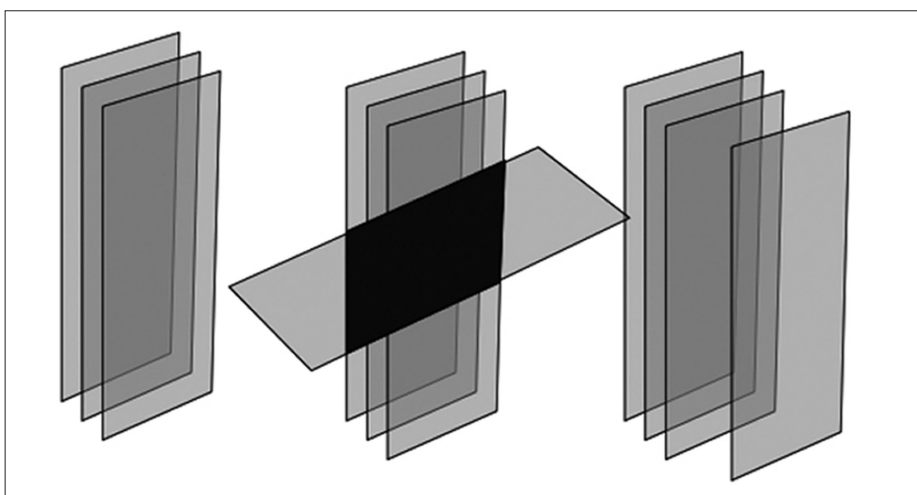


Fig. 10. Più polaroid paralleli. Un polaroid analizzatore deve essere disposto parallelamente ai primi tre per avere un massimo di trasmissione.

Si può concludere quindi che:

- un polaroid possiede una direzione privilegiata (direzione di polarizzazione), che determina la polarizzazione della luce trasmessa; tale direzione giace sul piano del polaroid e non dipende dalla sua forma geometrica, ma solo dalla sua struttura interna;
- la polarizzazione, essendo determinata dalla direzione di polarizzazione del polaroid attraverso cui è stata filtrata, è una proprietà della luce che ha carattere direzionale (ossia non è una proprietà scalare).

Due polaroid paralleli (incrociati) quindi sono due polaroid che hanno la direzione di polarizzazione parallela (ortogonale).

Per gli scopi del presente percorso è sufficiente riconoscere operativamente come agisce un polaroid nell'interazione con la luce che incide su di esso: attenua la luce non polarizzata come un filtro ordinario; attenua la luce polarizzata in funzione dell'angolo formato tra la direzione di polarizzazione della luce incidente e quella in cui il polaroid stesso polarizza la luce⁴.

1.2.4 La polarizzazione come proprietà trasversale della luce

Per identificare in quale direzione si manifesta la polarizzazione, si può partire dalla semplice situazione in cui un fascio di luce incide su due polaroid sovrapposti, le cui direzioni di polarizzazione formano un angolo α ($\alpha \neq 0^\circ$ e $\alpha \neq 90^\circ$) (fig. 11).

Ci si può chiedere:

Da che cosa dipende l'intensità della luce trasmessa da due polaroid?

Da che cosa dipende la polarizzazione della luce trasmessa da due polaroid?

Le grandezze che si possono variare in questo esperimento sono: l'intensità della luce incidente; l'orientazione e in generale la posizione di ciascun polaroid rispetto a un fissato sistema di riferimento (in figura i polaroid sono disposti su un piano parallelo a zy e la luce si propaga in una direzione parallela a x).

Per rispondere alla prima domanda è sufficiente utilizzare l'occhio (posto a distanza fissata rispetto alla sorgente) come strumento di rilevazione dell'intensità luminosa trasmessa dal secondo polaroid. Si osserva che l'intensità della luce trasmessa: a) aumenta (diminuisce) se aumenta (diminuisce) l'intensità della luce incidente; b) varia per una rotazione di uno qualsiasi dei due polaroid intorno alla direzione x e in particolare passa da un minimo con i polaroid incrociati e aumenta sino a raggiungere il massimo con i polaroid paralleli; c) non varia apprezzabilmente ruotando solidalmente i due polaroid, spostando uno o entrambi i polaroid lungo la direzione di propagazione della luce, ruotando i polaroid intorno a un asse ortogonale alla direzione di ⁵. L'intensità della luce trasmessa dai due polaroid dipende: dall'intensità della luce incidente, dall'angolo formato da ciascun polaroid rispetto agli assi yz , ossia dall'angolo delimitato dalle direzioni di polarizzazione di F1 e F2. L'intensità della luce trasmessa non dipende invece dall'angolo di una eventuale rotazione solidale dei due polaroid, né dalla posizione dei polaroid rispetto alla sorgente e all'osservatore (a patto, ovviamente, che i polaroid intercettino il fascio di luce).

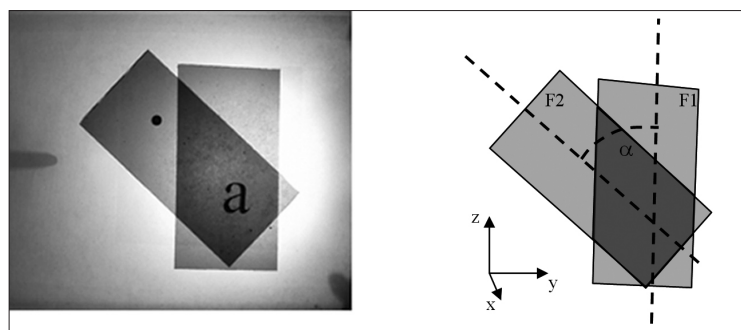


Fig. 11 Due polaroid che formano un angolo α , sono illuminati da una sorgente luminosa. F1 si trova più vicino alla sorgente, F2 si trova più vicino all'osservatore. I polaroid giacciono sul piano yz , la luce si propaga nella direzione x .

⁽⁴⁾ Per chi fosse curioso si può dire qui che ci sono diversi tipi di polaroid, i più comuni dei quali sono costituiti da catene polimeriche allineate per stress durante la lavorazione e rese conduttrici attraverso un opportuno drogaggio. Un filtro polaroid tende ad assorbire la luce polarizzata parallelamente alla direzione della catena polimerica e tende a trasmettere la luce polarizzata in direzione ortogonale. Questo fenomeno si chiama dicroismo. Per chi volesse approfondire può effettuare una ricerca in rete (es.: [http://en.wikipedia.org/wiki/Polaroid_\(polarizer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Polaroid_(polarizer))).

⁽⁵⁾ Bisogna effettuare le osservazioni richiamate in ambiente sufficiente oscuro per evitare di rilevare con l'occhio luce che non proviene direttamente dall'unica sorgente utilizzata.

Per rispondere alla seconda domanda il solo occhio non è sufficiente. È necessario utilizzare un terzo polaroid come analizzatore della polarizzazione. Si osserva che: a) indipendentemente dall'intensità della sorgente, dall'orientazione di F1, dalla posizione di F1 e F2 lungo la direzione x l'analizzatore deve sempre essere posto parallelamente a F2 per ottenere un massimo di trasmissione; b) se si ruota di un angolo β il polaroid F2, è necessario ruotare anche l'analizzatore dello stesso angolo β per riottenere un massimo di trasmissione.

La polarizzazione della luce trasmessa dal secondo polaroid dipende esclusivamente dalla direzione di polarizzazione del polaroid F2 rispetto al sistema di riferimento prescelto, essendo invece indipendente dalla polarizzazione della luce trasmessa dal polaroid F1, ovvero dalla orientazione e posizione di quest'ultimo.

La diversa modalità con cui si rileva l'intensità della luce trasmessa dai due polaroid (traguardando direttamente attraverso i due polaroid) e la polarizzazione della luce trasmessa (analizzandola con un terzo polaroid analizzatore) evidenzia la profonda diversità tra intensità e polarizzazione della luce. Dalle diverse osservazioni fatte si può riconoscere che la polarizzazione è una proprietà della luce che si manifesta in una direzione trasversale rispetto alla direzione di propagazione della luce. Tale direzione trasversale deve giacere sul piano identificato dalla direzione di propagazione della luce e dalla direzione di polarizzazione del polaroid attraverso cui viene trasmessa (fig. 12).

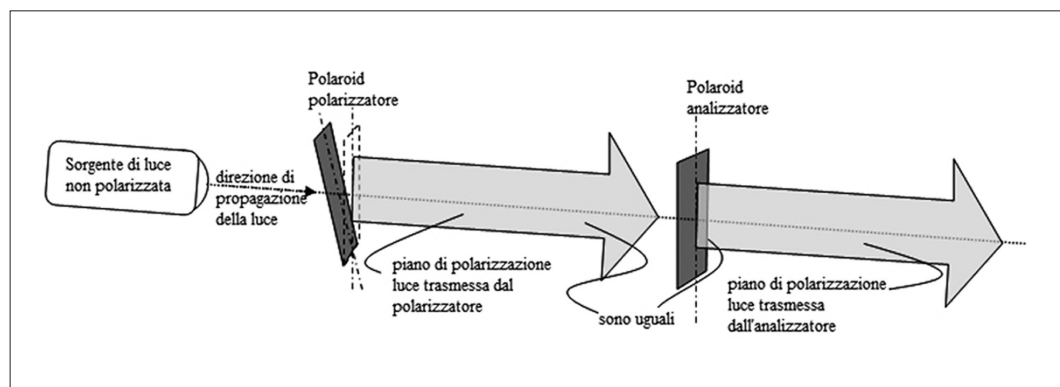


Fig. 12. Un fascio di luce non polarizzata incide su un polarizzatore. La polarizzazione della luce viene analizzata con un analizzatore. Le direzioni di polarizzazione del polarizzatore e dell'analizzatore giacciono sullo stesso piano. La polarizzazione della luce giace trasmessa da entrambi giace sempre sullo stesso piano.

Dato che l'intensità della luce trasmessa dall'analizzatore non dipende da una eventuale rotazione del polarizzatore intorno a un asse ortogonale alla direzione di propagazione della luce (fig. 13), mentre invece dipende fortemente da una eventuale rotazione del polarizzatore intorno alla direzione di propagazione della luce, come più volte osservato, la polarizzazione deve essere ortogonale alla direzione di propagazione della luce.

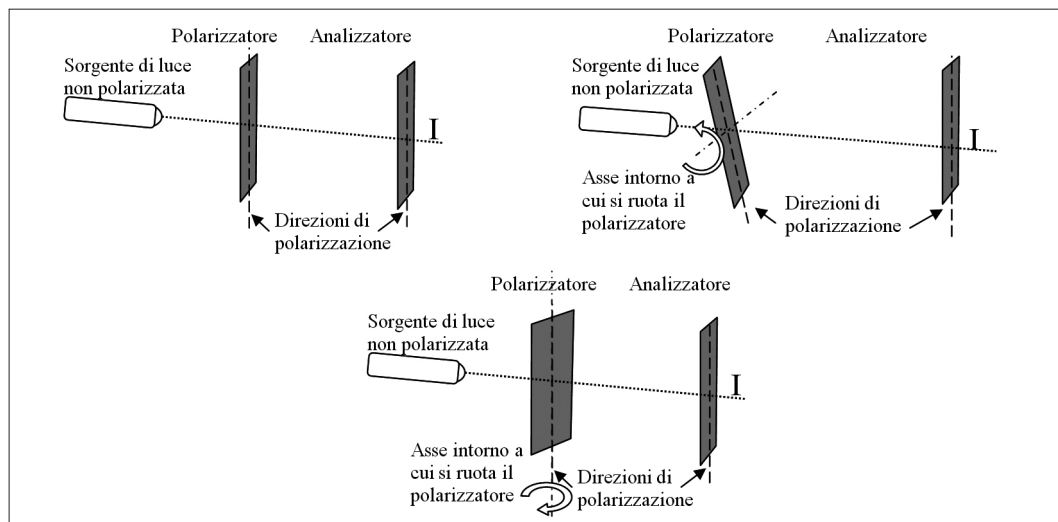


Fig. 13. L'intensità della luce rilevata da un analizzatore non cambia se si ruota il polarizzatore intorno a una direzione ortogonale rispetto alla direzione di propagazione della luce. Per tale rilevazione si può utilizzare l'occhio umano. Essa sarà quindi valida entro la sensibilità dell'occhio di percepire variazioni nell'intensità della luce trasmessa dall'analizzatore. Tale sensibilità è maggiore di quella dei comuni sensori di intensità luminosa per laboratorio didattico in commercio.

Si possono quindi precisare le conclusioni raggiunte nel punto precedente come segue:

- la polarizzazione è una proprietà della luce che si manifesta in direzione ortogonale a quella di propagazione della luce
- un polaroid polarizza la luce secondo la direzione ortogonale alla direzione di propagazione della luce, che giace sul piano definito dalla direzione di polarizzazione del polaroid e dalla direzione di propagazione della luce. (fig. 14)

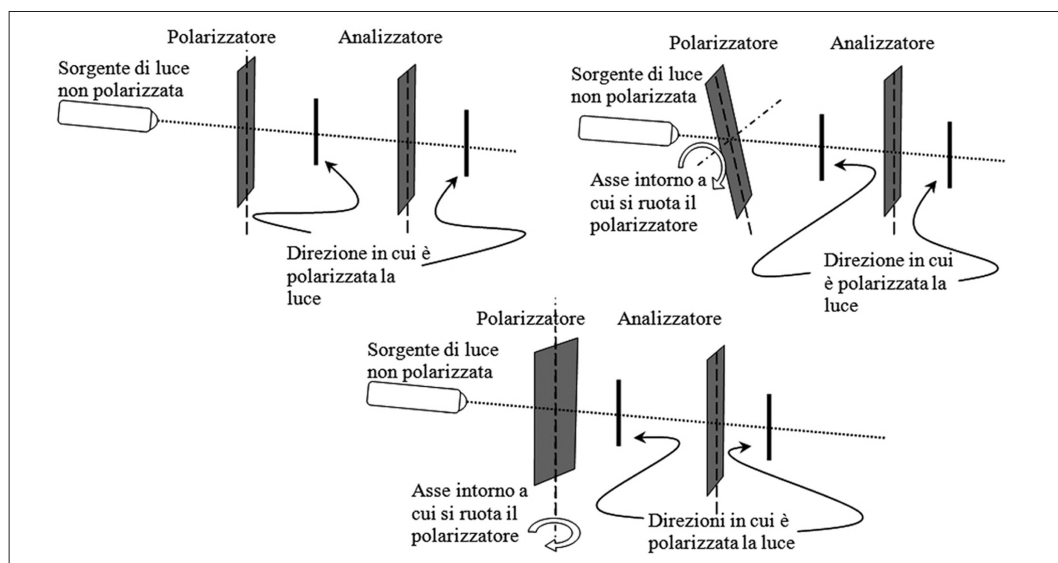


Fig. 14. La luce che attraversa un polaroid acquista una polarizzazione la cui direzione è ortogonale a quella di propagazione della luce giace sul piano definito dalla direzione di propagazione e dalla direzione di polarizzazione del polaroid.

Si possono considerare, in particolare, le situazioni estreme: a) quella in cui un fascio di luce ha polarizzazione parallela a quella della direzione di polarizzazione del polaroid su cui incide, per cui si ha un massimo di trasmissione, ossia la luce viene praticamente tutta trasmessa dal polaroid; b) quella in cui un fascio di luce ha polarizzazione ortogonale alla direzione di polarizzazione del polaroid su cui incide, per cui si ha un minimo di trasmissione, ossia la quasi estinzione del fascio trasmesso e il quasi completo assorbimento della luce incidente.

Per poter generalizzare la rappresentazione della polarizzazione che è stata introdotta, considerando il caso in cui le direzioni di polarizzazione dei polaroid formano un angolo generico α , è necessario da un lato approfondire il ruolo che i polaroid hanno nell'interazione con la luce, dall'altro è necessario determinare la legge con cui varia l'intensità della luce trasmessa dai due polaroid in funzione α .

Questi sono gli obiettivi dei prossimi due punti.

1.2.5 Il ruolo attivo del polaroid.

Per caratterizzare il modo peculiare con cui un polaroid interagisce con la luce e in particolare riconoscere il ruolo attivo che ha il polaroid in tale interazione si può considerare la seguente situazione.

Due polaroid incrociati sono posti sulla lavagna luminosa. In tale situazione l'intensità della luce trasmessa è praticamente nulla.

Ci si può chiedere se, appoggiando un terzo polaroid sopra ai primi due, oppure inserendo il terzo polaroid tra essi, cambia l'intensità della luce trasmessa.

È facile rendersi conto, che, comunque si disponga il terzo polaroid, sopra ai primi due, la zona in cui i due polaroid sono sovrapposti resta buia. Viceversa è piuttosto sorprendente constatare, che, inserendo obliquamente il terzo polaroid, fra i primi due si osserva che parte della luce viene trasmessa (Fig.15).

Se si ruota il polaroid centrale si passa gradualmente: a) da un minimo di trasmissione, quando la sua direzione di polarizzazione è parallela a quella di uno degli altri due polaroid; b) a un massimo quando la sua direzione di polarizzazione è a 45° rispetto a quella degli altri due; c) a un nuovo minimo quando il terzo polaroid assume la stessa direzione di polarizzazione dell'altro polaroid.

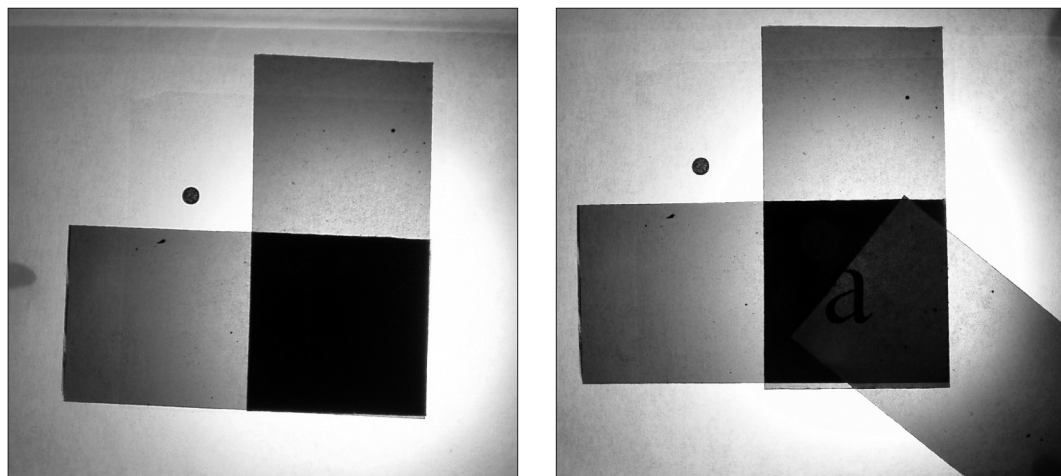


Fig. 15. Tra due polaroid incrociati (a sinistra), viene inserito un terzo polaroid a 45° rispetto agli altri due (a destra).

Si può descrivere come cambia la polarizzazione della luce utilizzando la rappresentazione che è stata introdotta nel punto precedente (fig. 16).

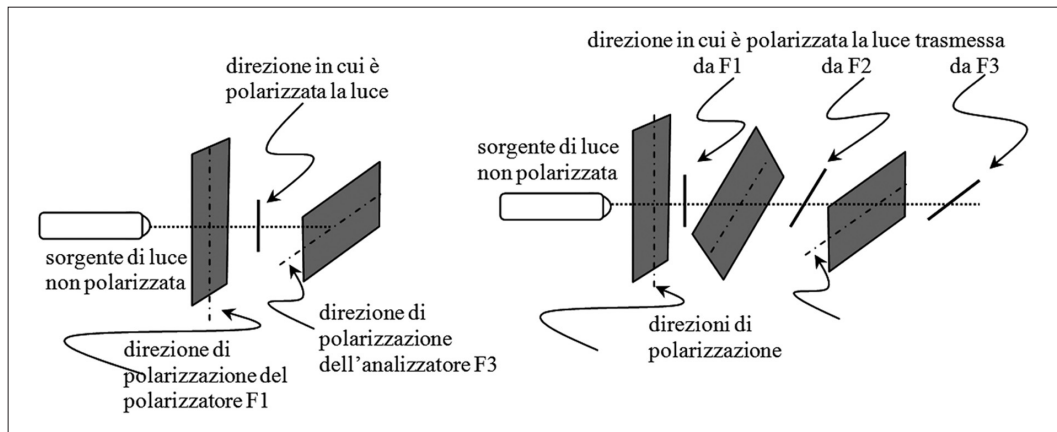


Fig. 16. Nella figura a sinistra polarizzatore F1 e analizzatore F3 sono incrociati. La luce non polarizzata prodotta dalla sorgente viene filtrata da F1 e polarizzata secondo la sua direzione di polarizzazione. L'analizzatore F3 ha una direzione di polarizzazione ortogonale alla direzione in cui è polarizzata la luce. Tutta la luce viene assorbita dall'analizzatore. Nella figura a destra, la luce trasmessa da F1 ha polarizzazione non ortogonale alla direzione di polarizzazione di F2. Viene quindi parzialmente trasmessa da F2 con una polarizzazione determinata dalla direzione di polarizzazione di F2. La luce che incide sull'analizzatore F3 viene a sua volta parzialmente trasmessa con una direzione di polarizzazione determinata dalla direzione di polarizzazione di F3. La polarizzazione della luce trasmessa da F1 e quella della luce trasmessa da F2 sono tra loro ortogonali.

La presenza del polaroid F2 inserito tra gli altri due polaroid incrociati, determina un cambiamento nella polarizzazione della luce, che quindi può incidere su F3 con polarizzazione non ortogonale alla direzione di polarizzazione di F3 e quindi venire almeno in parte trasmessa.

L'osservazione che l'intensità della luce trasmessa da più polaroid disposti in successione, dipende in modo decisivo dall'ordine con cui sono disposti i polaroid, ossia il fatto che la direzione in cui è polarizzata la luce venga modificata dal polaroid su cui essa incide, porta a riconoscere che:

- il polaroid ha un ruolo attivo nell'interazione con la luce.

Un polaroid dunque si caratterizza rispetto a un normale filtro rifrangente in quanto fa acquisire o modifica le proprietà della luce che incide su di esso, in particolare polarizza la luce trasmessa in direzione parallela alla direzione di polarizzazione del polaroid nel primo caso, cambia la direzione di polarizzazione della luce trasmessa nel secondo caso, facendola diventare parallela a quella della direzione di polarizzazione del polaroid stesso.

L'attenuazione della luce nell'attraversare un polaroid è pertanto in parte legata all'azione di polarizzatore (ruolo attivo del polaroid nell'interazione legato alla sua peculiarità rispetto agli altri filtri) e in parte all'azione di attenuatore non dissimile da quella degli ordinari filtri rifrangenti (ruolo passivo del polaroid nell'interazione con la luce legato agli stessi processi accennati nella nota²).

1.2.6 Riepilogo delle osservazioni qualitative sulla polarizzazione.

Con pochi polaroid appoggiati sulla lavagna luminosa, che vengono opportunamente disposti, ruotati, sovrapposti, si può introdurre operativamente la polarizzazione della luce, senza fare alcun riferimento a un suo inquadramento teorico, in particolare riconoscendo che:

- I polaroid attenuano la luce che incide su di essi in misura crescente con il loro numero, ma contemporaneamente in dipendenza dall'angolo formato tra essi
- L'intensità della luce trasmessa da due polaroid passa progressivamente e periodicamente da un massimo di trasmissione, quando i polaroid sono disposti parallelamente fra loro, a un minimo di trasmissione (per cui l'intensità è praticamente trascurabile), quando i polaroid sono incrociati (ortogonali fra loro). Si passa da un massimo a minimo di trasmissione per una rotazione di uno dei polaroid di 90° .
- L'orientazione del primo polaroid determina l'interazione della luce, da esso trasmessa, con il

secondo polaroid. La luce trasmessa dal primo polaroid possiede una proprietà che si manifesta nell'interazione con il secondo polaroid o, in altre parole, che viene evidenziata analizzandola con un secondo polaroid.

- Il primo polaroid: polarizza (linearmente) la luce, il secondo polaroid analizza la polarizzazione della luce trasmessa dal primo
- La luce emessa da una ordinaria sorgente luminosa interagisce con il polaroid sempre nello stesso modo, indifferentemente dalla orientazione di quest'ultimo e quindi non manifesta alcuna proprietà particolare rispetto a come opera un polaroid, ossia risulta non polarizzata.
- Un modo per produrre luce polarizzata (linearmente) è quello di far incidere un fascio di luce su un polaroid. La luce da esso trasmessa risulta polarizzata. Per analizzare se la luce è polarizzata si osserva la variazione dell'intensità della luce trasmessa da un analizzatore (ossia un altro polaroid) che viene ruotato intorno alla direzione di osservazione.
- Con un polaroid, usato come analizzatore, si può facilmente riconoscere che nei fenomeni quotidiani la luce risulta quasi sempre almeno parzialmente polarizzata. Si osserva cioè attraverso l'analizzatore, quando viene ruotato intorno alla direzione di osservazione, una variazione della luce trasmessa.
- Dalla geometria dei polaroid si può riconoscere in modo abbastanza immediato che la polarizzazione è una proprietà trasversale rispetto alla direzione di propagazione della luce, ossia può essere descritta associando ad essa una direzione ortogonale alla direzione di propagazione della luce (se fosse una proprietà longitudinale ci dovrebbe essere un passaggio di luce attraverso due polaroid incrociati).

1.2.7 Le leggi fenomenologiche della polarizzazione: La legge di Malus e di trasmissione

Dall'esplorazione iniziale con i polaroid sulla lavagna luminosa è emerso che i polaroid agiscono sia come filtri attivi, ossia polarizzano (linearmente) secondo una ben definita direzione la luce che li attraversa, sia come filtri passivi, ossia attenuano comunque la luce che li attraversa come un qualsiasi altro filtro.

Per studiare sul piano quantitativo il primo fenomeno si può rilevare l'intensità I della luce trasmessa da due polaroid al variare dell'angolo α formato dalle loro direzioni di polarizzazione, a partire dalla situazione per cui si ha un massimo di trasmissione (polaroid paralleli) o un minimo (polaroid incrociati).

Nella scheda Esperimento Malus è descritta nel dettaglio la procedura di misura e sono presentati e discussi i dati campione della misura. Da essi emerge, che, in particolare quando si utilizza come sorgente un laser, l'intensità della luce I trasmessa dal secondo polaroid in funzione di α è data dalla relazione⁶:

$$I(\alpha) = I_{\max} \cos^2(\alpha) \quad (1)$$

dove I_{\max} è l'intensità massima rilevata. Tale legge è detta legge di Malus⁷ (fig. 17).

⁽⁶⁾ In tutti i libri di testo la legge di Malus viene riportata come $I_t = I_o \cos^2 \alpha$, con I_o intensità della luce incidente. La legge espressa in questo modo varrebbe solo per polaroid ideali.

⁽⁷⁾ Etienne-Louis Malus (1775–1812), ufficiale francese che per primo introdusse la legge che porta il suo nome, studiando la polarizzazione per riflessione e il fenomeno della birifrazione, al quale si erano già interessati Newton e Huygens in precedenza.

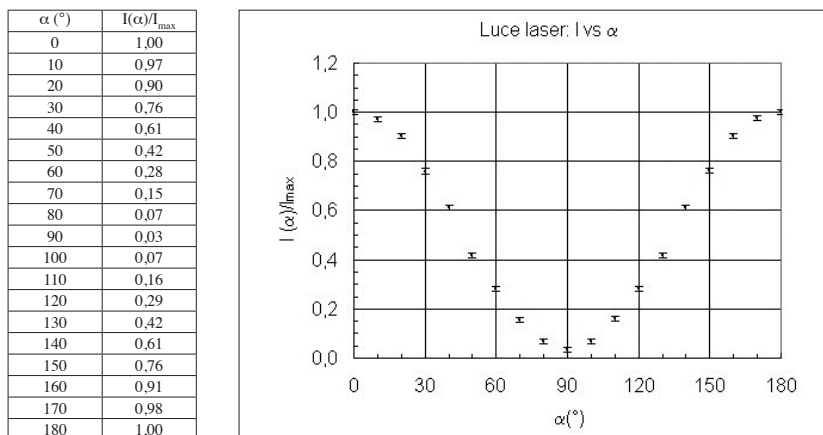


Fig. 17. L'intensità della luce trasmessa da due polaroid in funzione dell'angolo formato dalle direzioni di polarizzazione dei due polaroid.

Il carattere passivo dei filtri polaroid può essere studiato misurando l'intensità della luce trasmessa da più polaroid paralleli. Dai dati campione e dalla loro discussione emerge che un polaroid attenua la luce polarizzata, che incide su di essi, di un fattore costante T , detto anche coefficiente di trasmissione, dato da:

$$T = I_t / I_i \quad (2)$$

con I_t e I_i rispettivamente intensità della luce trasmessa e incidente. Se sul polaroid incide luce non polarizzata, l'intensità della luce trasmessa è data da: $I_t = I_i 0,5 T$.

È possibile sintetizzare le due leggi (1) e (2) nella seguente unica relazione:

$$I_t = I_o T \cos^2 \alpha, \quad (3)$$

dove I_t è l'intensità della luce trasmessa da un polaroid F2, su cui incide il fascio di luce di intensità I_o trasmesso da un primo polaroid F1.

Il fattore $\cos^2 \alpha$, che emerge come esito della legge di Malus, caratterizza la capacità del polaroid di polarizzare la luce trasmessa secondo una direzione ben definita. Il fattore T tiene conto di tutti quei processi che avvengono inevitabilmente nell'interazione della luce con un mezzo qualsiasi, come la riflessione, la diffusione, l'assorbimento⁸.

1.2.8 Rappresentazione della polarizzazione e dell'intensità.

Fino ad ora la polarizzazione è stata rappresentata iconograficamente con una linea. Se si identifica tale linea con un vettore, si può riconoscere che:

- il fattore $\cos^2 \alpha$, che caratterizza la legge di Malus, può essere ottenuto come quadrato del prodotto scalare dei due vettori che rappresentano la direzione di polarizzazione della luce, rispettivamente prima di incidere su F2 e dopo essere stata trasmessa da esso.

⁽⁸⁾ In un approccio alla fisica quantistica basato sul contesto della polarizzazione, ricavare sperimentalmente la legge (1) pone le basi per costruire consapevolmente i seguenti passaggi: A - passare dalla fenomenologia dell'ottica fisica, alla fenomenologia dell'interazione di fotoni con la materia; B - passare dalla fenomenologia dei fasci intensi a quella a singolo fotone; C - interpretare la legge (1) in termini probabilistici o statistici; D - passare dalla interazione di fotoni con polaroid reali a quella con polaroid ideali ($T=1$).

Sulla base di questa regola è possibile dare una rappresentazione completa dei processi che sono stati esaminati tenendo conto sia della polarizzazione, sia dell'intensità della luce. Il fattore $\cos^2\alpha$ fornisce infatti la frazione di luce che viene trasmessa da un polaroid e, come si è detto, può essere facilmente calcolato attraverso il prodotto scalare dei versori che descrivono la polarizzazione.

Per rappresentare la polarizzazione e l'intensità con un versore ci sono sostanzialmente due sole scelte: utilizzare un vettore dato dal prodotto della radice quadrata dell'intensità della luce per il versore che individua la polarizzazione; un numero di versori proporzionale all'intensità della luce. Si sceglie di utilizzare la seconda modalità di rappresentazione.

Questa scelta permette di rappresentare in modo coerente anche la luce non polarizzata. Essa può infatti essere pensata come formata da luce che ha polarizzazione secondo ogni direzione. Potremo allora rappresentare la luce non polarizzata come un insieme incoerente di linee orientate lungo ogni direzione possibile trasversale a quella di propagazione della luce.

Si può dunque dare una rappresentazione completa dei processi analizzati nel punto E come illustrato in fig. 18, dove il numero di linee rappresentate è proporzionale all'intensità e la loro direzione è parallela a quella della polarizzazione della luce.

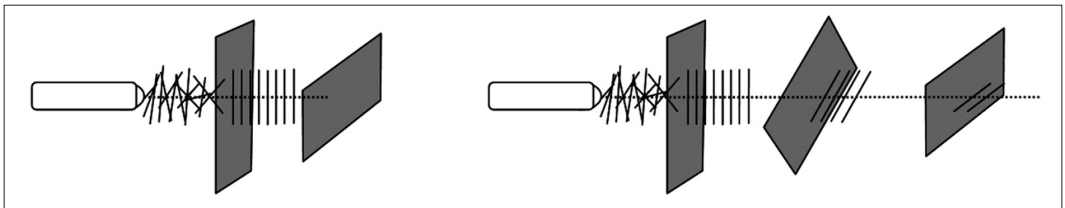


Fig. 18. Nella figura a sinistra i due polaroid sono incrociati. La luce non polarizzata prodotta dalla sorgente viene filtrata dal primo polaroid. Se $T=1$, metà della luce incidente viene trasmessa con polarizzazione secondo la direzione permessa di F2 (se $T<1$ andrebbe rappresentata una frazione di linee proporzionale a T). Nella figura a destra oltre al cambiamento nella polarizzazione della luce è rappresentato un numero di linee proporzionale alle intensità trasmesse (nell'ipotesi in cui $T=1$).

1.2.9 Interazione della luce con cristalli birifrangenti

Come si è visto nella sezione D), un fenomeno in cui la polarizzazione è particolarmente evidente è quello della birifrangenza, che viene pertanto considerata per prima, come del resto avvenuto storicamente.

Un tipico cristallo birifrangente è la calcite tipo spato d'Islanda (d'ora in poi semplicemente cristallo di calcite). È un cristallo trasparente a forma di parallelepipedo con i tre spigoli che formano angoli uguali di 120° , rispetto all'asse di maggiore simmetria del cristallo (alle ottico).

Per introdurre questa fenomenologia si può cominciare ponendo un cristallo di calcite sulla pagina di un libro (fig. 19), oppure lo si può disporre sopra alla lettera disegnata su un lucido, sopra ad una lavagna luminosa. La scritta della pagina o la lettera disegnata sul lucido risultano sdoppiate. Il cristallo infatti trasmette due diverse immagini: una, che è prodotta dal fascio di luce che segue le normali leggi della rifrazione nel passare dall'aria al cristallo e viceversa, viene detta ordinaria; l'altra, che segue una legge di rifrazione anomala nel passaggio dall'aria al cristallo e viceversa, viene detta straordinaria. Per questo motivo, tale fenomeno prende nome di birifrangenza (doppia rifrangenza) ed è importante qui, perché le due immagini risultano polarizzate ortogonalmente una rispetto all'altra, come è facile



Fig. 19. Un cristallo di calcite sul foglio di un libro.

osservare con un polaroid usato come analizzatore. Quando l'analizzatore è disposto approssimativamente secondo una diagonale di una faccia del cristallo si osserva una immagine (l'altra è completamente estinta), ruotando progressivamente l'analizzatore, si osserva che cambia l'intensità di ciascuna delle due immagini. Per una rotazione di 90° dell'analizzatore, si osserva solo l'altra immagine (la prima si è completamente estinta) (Fig. 20).

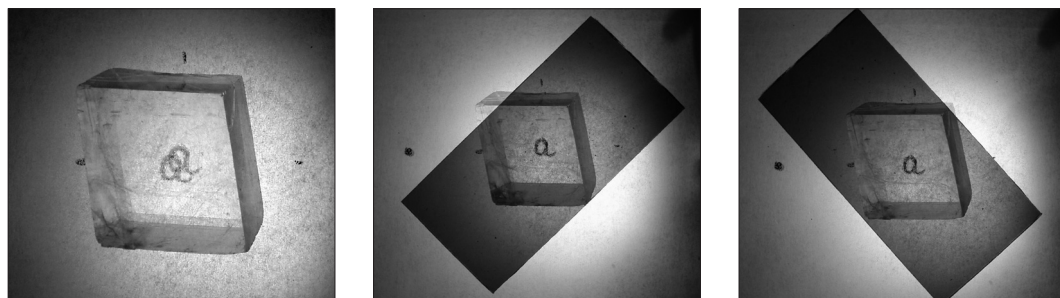


Fig. 20. Analisi della polarizzazione delle immagini prodotte da un cristallo birifrangente, appoggiando un polaroid sopra al cristallo di calcite.

Se si ruota il cristallo intorno alla direzione di propagazione della luce incidente, si osserva che un'immagine ruota intorno all'altra. L'immagine che resta fissa è quella prodotta dalla luce che subisce una rifrazione ordinaria, quella che ruota è prodotta invece dalla luce che subisce la rifrazione anomala. È facile riconoscere che la direzione in cui si forma la rifrazione anomala e la polarizzazione dei fasci sono rigidamente definite dalla orientazione del cristallo nello spazio (ossia rispetto a un fissato sistema di riferimento), da cui si può avere una prima evidenza che la birifrangenza è strettamente legata alla

struttura del cristallo e in particolare alla sua anisotropia (ossia la diversa struttura del cristallo quando viene osservato in direzioni diverse).

Si può studiare come interagisce la luce polarizzata con il cristallo ponendo sotto ad esso un polaroid (fig. 21). Se si ruota il polaroid lasciando fisso il cristallo si osserva che le immagini cambiano

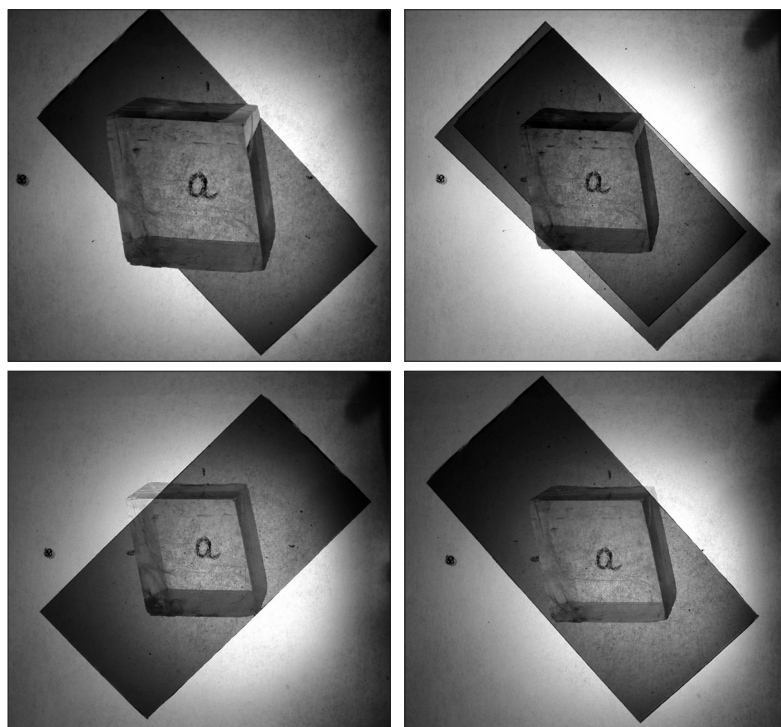


Fig. 21. Analisi della interazione di luce polarizzata con un cristallo di calcite appoggiato su un polaroid (foto in lato). Con un polaroid analizzatore, appoggiato a sua volta sopra al cristallo (foto in basso), si analizza la polarizzazione della luce trasmessa.

intensità sino alternativamente ad estinguersi. Per passare dalla posizione in cui si osserva una sola immagine a quella in cui si osserva l'altra sola immagine si deve ruotare il polaroid di 90° .

Anche per questo fenomeno si può vedere che vale la legge di Malus: la prima immagine ha intensità proporzionale a $\cos^2\alpha$; la seconda ha intensità proporzionale a $\sin^2\alpha = \cos^2(90^\circ - \alpha)$. In questo caso α è l'angolo tra la polarizzazione della luce incidente e la polarizzazione del primo fascio considerato. Se si posiziona il polaroid sotto al cristallo in modo da osservare un'unica immagine e con un analizzatore si rileva la polarizzazione dell'unica immagine che si osserva, si riconosce facilmente che la luce incidente e quella della sola immagine trasmessa sono uguali. Nel cristallo dunque si propaga solo l'immagine ordinaria (straordinaria) quando la polarizzazione della luce incidente ha la stessa polarizzazione di quest'ultima.

L'esplorazione può essere estesa utilizzando come sorgente il fascio laser di un puntatore, che si è visto è un fascio di luce polarizzata. In questo caso all'uscita dal cristallo emergono in generale due fasci paralleli, ciascuno con polarizzazione ortogonale a quella dell'altro (fig. 22). Se si ruota il puntatore laser intorno al suo asse e quindi si ruota la direzione di polarizzazione della luce emessa, si osserva che l'intensità di ciascuno dei due fasci varia secondo la legge di Malus.

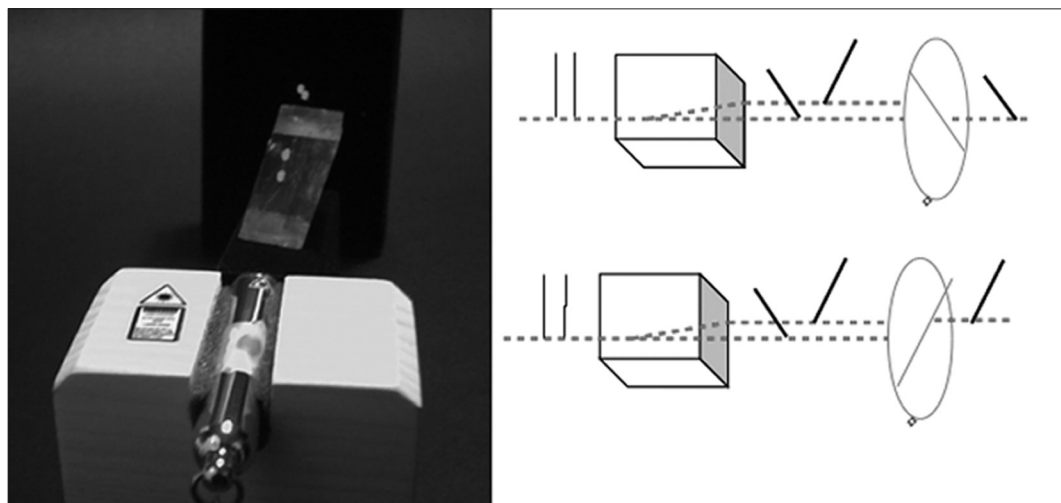


Fig. 22. Interazione di un fascio laser con un cristallo birifrangente e schematizzazione con la rappresentazione vettoriale introdotta.

Questo non deve sorprendere se si considera che anche un polaroid è in realtà un mezzo birifrangente. A differenza di un cristallo di calcite, in cui i due fasci si propagano in generale senza subire attenuazione apprezzabile (se non quella dovuta alla diffusione causate dalle eventuali imperfezioni), in un polaroid uno dei due raggi viene assorbito quasi completamente dal polaroid stesso, l'altro viene in gran parte trasmesso.

Queste semplici osservazioni fanno riconoscere che vi è una stretta correlazione tra la polarizzazione della luce e il percorso che essa segue.

Nella prospettiva di analizzare questa fenomenologia, per utilizzarla in contesto ideale per discutere i concetti e le idee della meccanica quantistica, risultano particolarmente significative le situazioni in cui due cristalli birifrangenti di uguali dimensioni sono allineati con il fascio del puntatore laser. Tre sono le situazioni di interesse:

- 1) due cristalli sono disposti con le facce parallele (cristalli diretti) (fig. 23)
- 2) a partire dalla situazione precedente, il secondo dei due cristalli viene ruotato di 45° intorno alla direzione della propagazione in aria della luce (fig. 24)

3) a partire dalla situazione del punto 1) il secondo dei due cristalli viene ruotato di 180° intorno alla direzione di propagazione, risultando l'immagine speculare del primo (cristalli inversi) (fig. 25). In tutti i casi il primo cristallo viene illuminato con il fascio laser orientato in modo che la polarizzazione della luce che esso emette è verticale. I due raggi che si propagano nel secondo cristallo hanno, allora, la stessa intensità e polarizzazione a 45° e a 135° rispettivamente.

Le tre situazioni si differenziano per gli effetti osservati.

1) Dal secondo cristallo emergono due fasci, ciascuno dei quali ha la stessa polarizzazione del corrispondente fascio emerso dal primo cristallo. I due fasci che incidono sul secondo cristallo non si sdoppiano, ma si comportano rispettivamente come fascio ordinario e fascio straordinario a seconda della polarizzazione che hanno inizialmente. Le intensità dei due fasci sono uguali la separazione dei fasci aumenta (fig. 23).

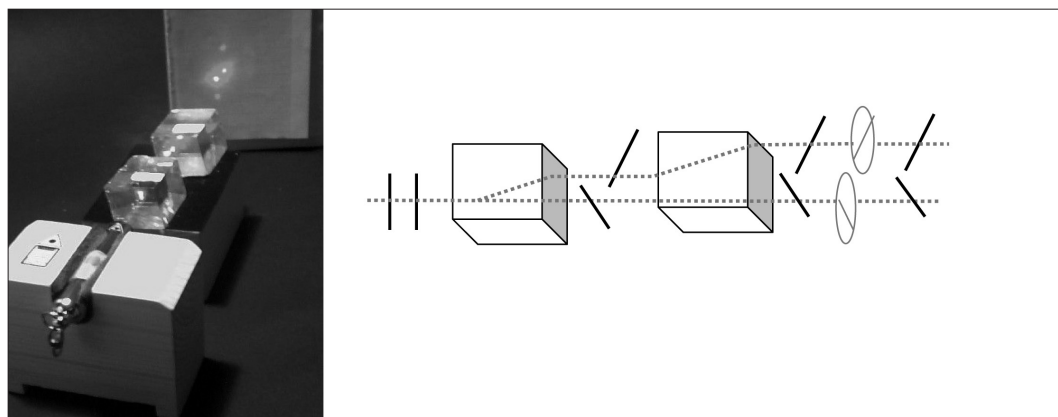


Fig. 23. Interazione di un fascio laser con un cristallo birifrangente e schematizzazione con la rappresentazione vettoriale introdotta.

2) Dal secondo cristallo emergono 4 fasci che hanno la stessa intensità, pari a $\frac{1}{4}$ dell'intensità della luce incidente (supposte trascurabili le attenuazioni dei fasci). Due di essi hanno la stessa polarizzazione del fascio del puntatore laser e due hanno polarizzazione ad essa ortogonale.

Ad esempio in figura 24 si è rappresentata la situazione in cui i fasci ordinari emersi dal secondo cristallo hanno la stessa polarizzazione della luce incidente sul primo cristallo, mentre i due fasci straordinari hanno polarizzazione ortogonale a quella della luce incidente sul primo cristallo.

Ciascuno dei due fasci emersi dal primo cristallo dà luogo a una doppia rifrazione.

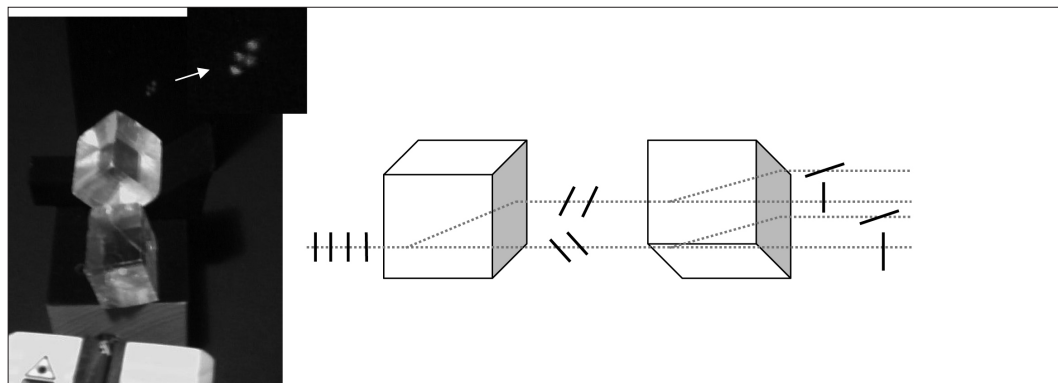


Fig. 24. Un fascio laser incide su due polaroid ruotati di 45° . I quattro fasci che emergono dal secondo cristallo hanno uguale intensità pari a $\frac{1}{4}$ dell'intensità della luce incidente.

- 3) Dal secondo cristallo emerge un solo fascio. I due fasci emersi dal primo cristallo subiscono processi inversi di rifrazione quando incidono sul secondo cristallo e vengono quindi sovrapposti in uscita da quest'ultimo. La polarizzazione del fascio emergente, in condizioni ideali, è uguale a quella del fascio del puntatore laser. In realtà tale fatto viene in genere mascherato dagli effetti dovuti alla distruzione di coerenza dei due fasci trasmessi tra i due cristalli (fig. 25).

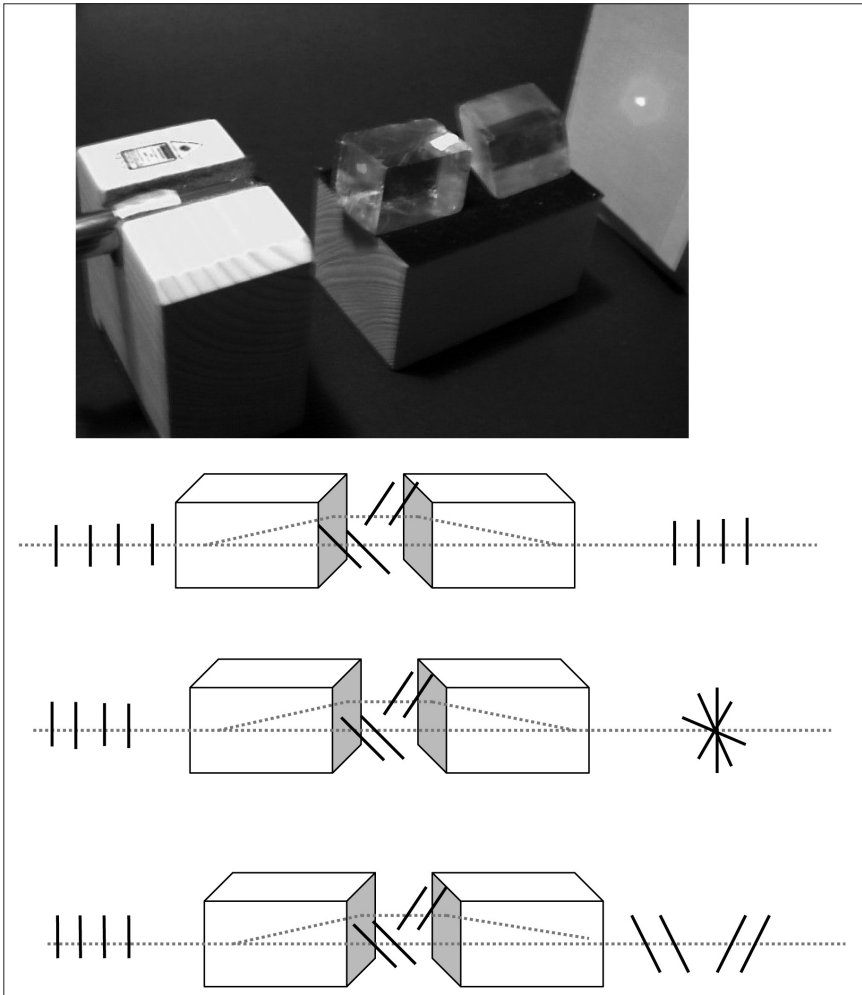


Fig. 25. La ricombinazione dei fasci con due cristalli di calcite invernici e i possibili esiti dell'esplorazione della luce emergente dal secondo cristallo.

Questo esperimento mette in luce, in ogni caso, che alla polarizzazione, oltre che una direzione, deve essere associato anche un verso.

- È più appropriato allora rappresentare la polarizzazione con un versore e non solo con una linea come fatto sino ad ora.

1.2.10 Polarizzazione per riflessione e per rifrazione

Dopo aver affrontato lo studio della birifrangenza, si può considerare più approfonditamente i processi di polarizzazione nei fenomeni per riflessione e rifrazione da una lamina rifrangente.

Con un polaroid si analizza la polarizzazione della luce riflessa da una lastra di materiale rifrangente (ad esempio un lucido per proiezioni) per vari angoli di incidenza.

Si riconosce che per un angolo di incidenza prossimo a 60° , l'intensità della luce trasmessa dal polaroid varia con l'angolo di cui viene ruotato l'analizzatore e quindi la luce riflessa risulta parzialmente polarizzata (fig. 26).

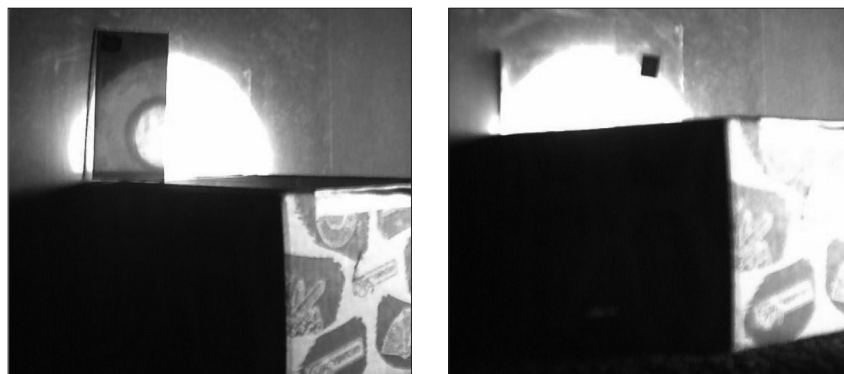


Fig. 26. Analisi della polarizzazione per riflessione. La luce viene trasmessa con diversa intensità quando si ruota il polaroid: è massima con il polaroid orientato con la direzione di polarizzazione orizzontale e minima con il polaroid orientato con la direzione di polarizzazione verticale.

Per angoli di incidenza prossimi a zero (incidenza quasi normale) al variare dell'orientazione del polaroid si osserva sempre la stessa intensità, la luce riflessa non risulta polarizzata (fig. 27).



Fig. 27. Analisi della polarizzazione della luce riflessa per incidenza quasi normale. La luce non risulta polarizzata, in quanto l'intensità della luce trasmessa dall'analizzatore è sempre la stessa.

- In generale, quindi, la luce riflessa risulta parzialmente polarizzata con grado diverso a seconda dell'angolo di incidenza, in particolare: non è polarizzata per incidenza normale; è maggiormente polarizzata per angoli di incidenza prossimi a 60° .

In ogni caso la direzione secondo cui si deve disporre il polaroid analizzatore per avere un massimo di trasmissione è sempre la stessa, ossia la luce anche solo parzialmente polarizzata, viene comunque sempre polarizzata in una stessa direzione.

La polarizzazione della luce riflessa è definita una volta che è fissato il piano formato dalla luce incidente e dalla normale alla superficie riflettente nel punto di incidenza. L'orientazione della polarizzazione della luce dipende da tale geometria.

Questa esperienza può essere utilizzata per definire in modo non arbitrario la direzione di polarizzazione del polaroid.

Se si ripete l'osservazione con un normale specchio argentato, la luce riflessa non risulta mai polarizzata. La luce quindi si polarizza per riflessione solo se incide su una lamina rifrangente, ma non se si riflette su una lamina metallica (fig. 7 a destra).

Per porre su basi quantitative queste osservazioni, è conveniente introdurre un opportuno rapporto che consenta di misurare il grado di polarizzazione. Questo può essere definito nel modo seguente:

$$R = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

con I_{\max} e I_{\min} rispettivamente intensità massima e minima trasmesse dal polaroid analizzatore. Se la luce risulta non polarizzata $I_{\max} = I_{\min}$ e quindi $R = 0$. Se la luce risulta totalmente polarizzata $I_{\min} = 0$ e quindi $R = 1$.

Per effettuare una misura del grado di polarizzazione di luce riflessa, si analizza la polarizzazione della luce riflessa da una lastra rifrangente al variare dell'angolo di incidenza e si rileva l'intensità massima e minima trasmessa dal polaroid analizzatore per ogni fissato angolo di incidenza. Per i vari angoli di incidenza si osserva un massimo di trasmissione attraverso il polaroid orientandolo sempre nella stessa direzione: la luce risulta polarizzata, anche se solo parzialmente, sempre nello stesso modo. Dalla misura del grado di polarizzazione per vari angoli di incidenza si ottiene un grafico come quello riportato in figura.

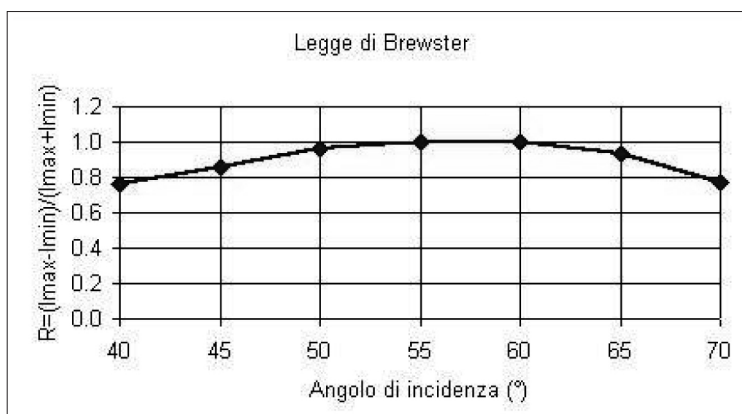


Fig. 28. Misura del grado di polarizzazione R della luce riflessa da una lamina rifrangente. Il valore dell'angolo per cui R è massimo prende il nome di angolo di Brewster.

Si riconosce che vi è un angolo per cui R è massimo. Tale angolo, che prende il nome di angolo di Brewster, risulta pari a $57^\circ \pm 2^\circ$ secondo i dati riportati nel grafico relativi ad una lastra di vetro.

(Nota: in letteratura si trovano i seguenti valori: vetro crown - $56^\circ 42'$, vetro flint - $58^\circ 47'$, da A Drigo, G Alocco, Fisica Pratica, Padova, 1944).

Si ripete la misura precedente misurando la luce trasmessa da più lastre rifrangenti. Si valuta il rapporto R al variare dell'angolo di incidenza della luce. Si riconosce che il massimo grado di polarizzazione si ha ancora per incidenza all'angolo di Brewster. Se si ricostruisce il cammino dei raggi luminosi per incidenza all'angolo di Brewster, si riconosce che la luce rifratta e quella riflessa formano un angolo di 90° . Tale condizione prende il nome di legge di Brewster.

1.2.11 Polarizzazione per diffusione.

Si è già visto che la luce diffusa nel cielo risulta polarizzata. Si può esplorare lo stesso fenomeno in laboratorio illuminando con una torcetta elettrica una soluzione salina sufficientemente concentrata trasparente o debolmente opaca. Con un polaroid si analizza la luce diffusa a vari angoli. Si riconosce che essa risulta in genere parzialmente polarizzata. Il maggiore grado di polarizzazione si ha osservando la luce diffusa perpendicolarmente alla direzione di incidenza (fig. 29), come si può riconoscere anche per la luce solare diffusa nel cielo. Per ogni direzione di osservazione la luce diffusa risulta comunque sempre polarizzata nella stessa direzione. Tale polarizzazione è fissata una volta fissato il piano determinato dalla direzione della luce incidente e dalla direzione di osservazione.

Si può anche osservare come la luce polarizzata venga prevalentemente diffusa perpendicolarmente rispetto alla direzione di incidenza lungo una unica direzione privilegiata. Se si ruota il puntatore laser intorno al suo asse anche tale direzione privilegiata di diffusione ruota (fig. 30).

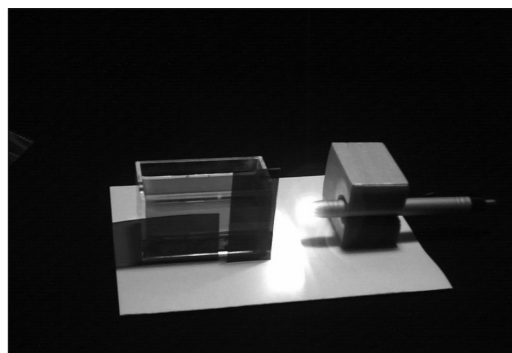


Fig. 29. La polarizzazione della luce diffusa da una soluzione salina per luce incidente non-polarizzata.

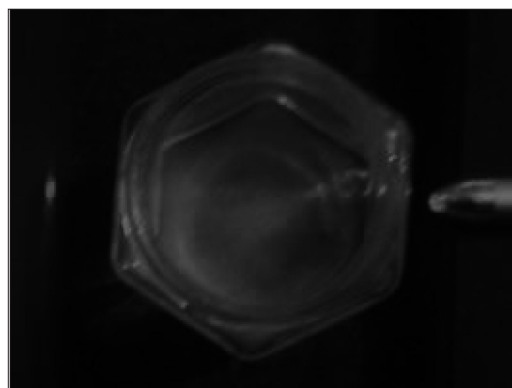
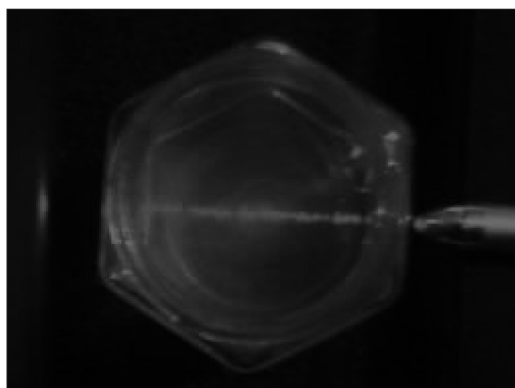


Fig. 30. La diversa diffusione per luce incidente polarizzata. Nella seconda immagine il puntatore laser è stato ruotato di 90° intorno al suo asse.

1.2.12 Applicazioni della polarizzazione

Per esemplificare alcune importanti applicazioni della luce polarizzata in altri ambiti si può considerare la situazione base in cui si illumina con luce laser o luce bianca, a seconda dei casi, due polaroid incrociati in modo da avere un minimo di trasmissione. Tra i due polaroid si inseriscono oggetti di materiali diversi. (Fig. 31).

Se tra i polaroid si inserisce un cristallo di calcite e si usa luce laser, in generale si osserveranno entrambi i fasci trasmessi dal cristallo. La presenza del cristallo produce infatti due fasci con polarizzazione ortogonale fra loro, ma in generale obliqua rispetto alla direzione di polarizzazione del polaroid in uscita. Entrambi i fasci vengono pertanto trasmessi dal secondo polaroid. Se si ruota il cristallo intorno alla direzione di propagazione della luce, si osserverà che i due fasci ruoteranno solidalmente con il cristallo e varieranno in intensità secondo la legge di Malus.

In modo del tutto analogo si può effettuare l'analisi ottica di un qualsiasi cristallo trasparente o sufficientemente sottile. La birifrangenza tuttavia non è in generale così evidente come nel caso della

calcite i due fasci non vengono pertanto separati spazialmente. Una volta trasmessi dal polarizzatore produrranno un fenomeno di interferenza costruttiva o distruttiva a seconda dei casi. L'osservazione in luce bianca produce interferenza dei diversi colori di cui è composta in punti diversi dando luogo a immagini colorate del cristallo. Sulla base di tale principio si basa l'analisi al microscopio in luce polarizzata di cristalli e minerali effettuata in mineralogia. L'utilizzo del microscopio è essenziale nel caso dell'analisi di sottili strati di minerali, formati da microcristalli. Dato che gli strati vengono lavorati con spessore standard è possibile risalire al tipo di cristalli presenti nel materiale sulla base dalla loro colorazione.

Se si illumina in luce bianca i due polaroid incrociati con in mezzo un oggetto di materiale plastico trasparente, ad esempio come una forchetta, si può osservare che la forchetta appare illuminata e colorata. Se si deformano i rebbi della forchetta si osserva che cambia la colorazione. Anche i materiali plastici presentano un certo grado di birifrangenza. Tale birifrangenza cambia quando sono sottoposti a sforzi. La mappatura dei colori può essere correlata alla struttura degli sforzi a cui è sottoposto l'oggetto.

Un'ulteriore applicazione riguarda il riconoscimento del potere rotatorio di una soluzione zuccherina. Si dispone un puntatore laser ad una distanza di circa 0,5 m da uno schermo. Si intercetta il fascio laser con i due polaroid incrociati. Fra i due polaroid si interpone una vaschetta contenente una soluzione di acqua e zucchero o acqua e fruttosio (fig. 32). Sullo schermo si osserva in generale la presenza di un fascio trasmesso dal sistema. Si può riottenere un minimo di trasmissione ruotando di un angolo opportuno il polaroid analizzatore. La soluzione zuccherina ruota la direzione di polarizzazione della luce incidente. La soluzione di zucchero (fruttosio) ruota la polarizzazione del fascio laser in senso orario (antiorario) guardando nel verso di propagazione della luce. Se si varia la concentrazione della sostanza disciolta si deve aumentare l'angolo per riottenere il minimo di trasmissione. Il valore dell'angolo può essere messo in relazione alla concentrazione della soluzione e alla lunghezza del campione.

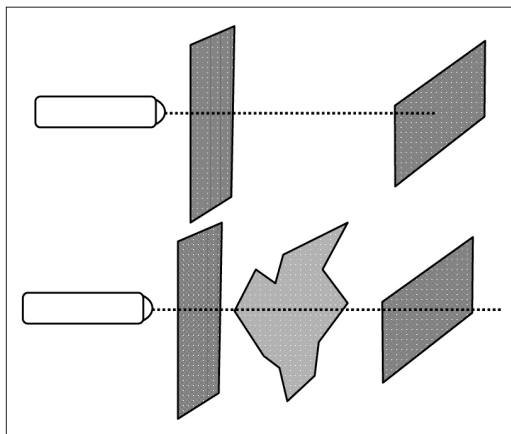


Fig. 31. Schema per un analizzatore in luce polarizzata: due polaroid incrociati sono illuminati da una sorgente di luce. Si inserisce l'oggetto da analizzare tra i due polaroid. Se l'oggetto è un cristallo o un mezzo otticamente attivo parte della luce viene trasmessa dall'analizzatore.

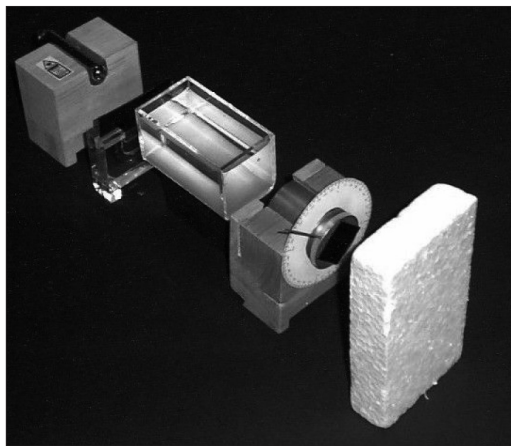


Fig. 32. Foto di apparato realizzato con materiali poveri per la misura del potere rotatorio di una soluzione zuccherina.

Capitolo 2.

Strumenti operativi per una didattica laboratoriale sulla polarizzazione ottica

Proposte didattiche anche dettagliatamente illustrate vengono sempre lette alla luce della propria personale esperienza e gestite con una trasformazione legata al personale stile professionale.

In questo campo si corre pertanto sempre il rischio di una trattazione non abbastanza dettagliata per evidenziare la specificità nel processo di apprendimento.

Tenere conto delle idee e dei ragionamenti dei ragazzi per produrre apprendimento implica inoltre avere strumenti di esplicitazione delle loro idee e produrre riflessione da parte loro sui processi. Ciò che chiamiamo didattica laboratoriale e che nella letteratura internazionale è collocata sotto il grande cappello dell'Inquiry Based Learning trova attuazione in percorsi interpretativi che integrano domande fenomenologiche con schemi di spiegazione capaci di fondare ulteriori domande di ricerca esplorativa e concettuale, di individuazione e utilizzo di strumenti formali.

Schede che rendono operativo questo processo di appropriazione nel costruire conoscenza sono uno strumento utile allo studente per focalizzare gli elementi concettuali e per il docente a riconoscere la specificità di un percorso proposto ex ante e le traiettorie di ragionamenti di ragazzi.

Le numerose sperimentazioni di ricerca condotte ci hanno permesso di costruire una collana di schede laboratoriali sulla polarizzazione ottica, che offriamo in questa sede come strumenti operativi per l'insegnante interessato a costruire specifici percorsi di apprendimento in cui lo studente focalizza ed esplicita le proprie idee e i propri ragionamenti.

2.1 Le sezioni in cui si articola il percorso di polarizzazione ottica

Esplorare la fenomenologia in modo laboratoriale significa porsi domande interpretative ad ogni passo di una esplorazione operativa organizzata secondo un filo coerente di ragionamenti. Ciò non significa organizzare un percorso rigido di passi ma articolare in modo coerente gli elementi di una costruzione concettuale che organizza un quadro interpretativo capace di render conto di ogni fenomeno esplorato con gli stessi strumenti e di inquadrare con essi ipotesi su nuovi fenomeni da esplorare. Risposte a domande non poste possono essere un insegnamento, ma non un apprendimento. Per l'apprendimento i problemi interpretativi vanno identificati e analizzati. Le schede esplorative tutoriali servono a questo.

Riportiamo qui di seguito le descrizioni delle schede operative offerte a titolo esemplificativo per percorsi laboratoriali sulla polarizzazione ottica.

Esse sono organizzate in sezioni tematiche che delineano ambiti in cui scegliere possibili articolazioni concettuali.

Sezione A - Esplorazione iniziale

Le quattro schede di questo primo gruppo propongono un approccio operativo alla polarizzazione della luce.

SCHEDA 01-PolLav - Produrre/Analizzare luce polarizzata con polaroid sulla lavagna luminosa. Questa scheda prevede l'attività di esplorazioni qualitative della luce trasmessa da polaroid appoggiati su una lavagna luminosa. Si riconosce la polarizzazione come proprietà trasversale della luce e il ruolo di filtri attivi giocato dai polaroid nell'interazione con la luce.

SCHEDA 02 - FormA - Rappresentazione della polarizzazione. Si suggerisce di rappresentare la polarizzazione con un vettore trasversale rispetto alla direzione di propagazione della luce. Tale rappresentazione a questo livello ha carattere iconico accessibile anche a bassi livelli scolari.

SCHEDA 03 - Quot - La polarizzazione nei fenomeni quotidiani. Si mira al riconoscimento della polarizzazione nei fenomeni quotidiani attraverso una carrellata di diverse situazioni: la luce riflessa

da superfici lucide. La luce trasmessa da sistemi di materiali diversi, la luce diffusa, la luce prodotta da sorgenti diverse.

SCHEDA 04 - PolRiepilogo - Riepilogo sulla esplorazione della polarizzazione. Questa scheda può essere assegnata come attività per casa ai ragazzi o proposta come attività di valutazione intermedia sull'apprendimento in riferimento a questa prima sezione di attività.

Sezione B - Le leggi Fenomenologiche

In questa sezione sono riunite le sette schede relative agli esperimenti per la costruzione delle leggi fenomenologiche, che descrivono l'interazione di luce polarizzata con la materia e pongono su basi quantitative le esplorazioni qualitative effettuate nelle altre sezioni. Sono suddivise in tre sezioni: B1) Legge di Malus; B2) Coefficiente di trasmissione di filtri rifrangenti e polaroid e Legge di Brewster; B3) Potere rotatorio.

SCHEDA 05- PolMalus1– La legge di Malus con luce polarizzata. SCHEDA 06 - PolMalus2– La legge di Malus con luce non polarizzata. Le schede mirano alla costruzione sperimentale della legge di Malus rispettivamente operando con luce laser e luce bianca non polarizzata. La seconda scheda può considerarsi un approfondimento rispetto alla prima e quindi può essere evitata in un percorso minimale.

SCHEDA 07 - PolMalusForm–Dalla legge di Malus alla rappresentazione formale della polarizzazione della luce. L'ultima scheda è focalizzata sulla costruzione di una rappresentazione vettoriale della polarizzazione in grado di rendere conto della legge di Malus.

SCHEDA 21 - PolTras1 – Trasmissività di filtri rifrangenti. SCHEDA 22 - PolTras2 – Trasmissività di filtri polaroid. Con l'utilizzo di sensori in linea, si rileva l'intensità della luce trasmessa da filtri rifrangenti e polaroid, caratterizzandone il comportamento come filtri passivi tramite la misura del loro coefficiente di trasmissione.

SCHEDA 23 - PolBrewster – Misura dell'angolo di Brewster. Questa scheda, che può essere affrontata separatamente dalle altre, riguarda la misura dell'angolo di Brewster, andando a rilevare il grado di polarizzazione della luce riflesse da una lamina di materiale rifrangente. Può essere completata con l'analisi completa della Legge di Brewster

SCHEDA 28 - PotRot – Mezzi otticamente attivi. L'ultima scheda di questa sezione, prevede una prima parte di esplorazione qualitativa con polaroid e luce laser e una seconda in cui si misura il potere rotatorio della soluzione zuccherina. Per una esplorazione qualitativa ci si può limitare solo alla prima parte della scheda.

Sezioni C - Birifrangenza e polarizzazione

La terza sezione è dedicata alla esplorazione dei fenomeni di birifrazione con cristalli di calcite tipo spato d'Islanda. È suddivisa in tre sottosezioni: C1) Studio della birifrangenza come modalità di produzione di luce polarizzata utilizzando sorgenti di luce non polarizzata; C2) Studio dell'interazione di luce polarizzata con cristalli birifrangenti; C3) analisi dell'interazione di un fascio di luce con due cristalli birifrangenti allineati.

C1 - Polarizzazione per birifrangenza

Le prime due schede di questa sezione sono fondamentali nello sviluppo del percorso, mentre la terza può essere considerata nel caso in cui si voglia approfondire il legame tra la direzione degli assi di simmetria, le direzioni in cui osservano le immagini trasmesse dal cristallo e le rispettive polarizzazioni. *SCHEDA 08 - BR1.1 Birifrangenza con un cristallo sul libro.* Si riconosce il fenomeno della birifrangenza dall'osservazione delle due immagini di un libro prodotte da un cristallo di calcite, riconoscendo operativamente che le due immagini sono una prodotta per rifrazione ordinaria e una prodotta per rifrazione straordinaria.

SCHEDA 09- BR1.2 La polarizzazione delle immagini prodotte dal cristallo di calcite sul foglio. La seconda scheda focalizza sulla diversa polarizzazione della luce trasmessa da un cristallo di calcite andandola ad esplorare con un polaroid usato come analizzatore di polarizzazione.

SCHEDA 10 - BR1.3 Polarizzazione per birifrangenza e simmetria del cristallo. L'ultima scheda

della sezione mira al riconoscimento della connessione tra anisotropia del cristallo, suoi assi di simmetria e diversa polarizzazione della luce trasmessa.

C2 – Birifrazione di luce polarizzata

La seconda sezione riguarda l'analisi della interazione di luce polarizzata con un cristallo birifrangente.

SCHEDA 11 - BR1.4 - Birifrangenza di luce polarizzata con il cristallo sul foglio

SCHEDA 12 - BR1.5 - L'interazione di luce laser con un cristallo birifrangente

Le due schede, che possono essere facilmente integrate e semplificate, propongono l'esplorazione dell'interazione di luce polarizzata, prodotta con il filtraggio di un polaroid e da un laser rispettivamente, con un cristallo di calcite. Si mira in particolare a riconoscere che nel cristallo si propaga un solo fascio di luce quando la luce incidente ha la stessa polarizzazione della luce trasmessa. Nei casi in cui ciò non avviene, le intensità dei fasci di luce trasmesse seguono la legge di Malus.

SCHEDA 13 - BR1.6 - La propagazione di un solo fascio in un cristallo birifrangente. Si considerano le situazioni in cui la luce, quando ha l'opportuna polarizzazione, dà luogo a un unico fascio trasmesso.

SCHEDA 14 - BR1.7 - Domande per casa sull'interazione di luce con un cristallo birifrangente. Una breve scheda di riepilogo viene proposta come lavoro da affidare ai ragazzi per casa.

C3 - Analisi dei fenomeni di polarizzazione con due cristalli birifrangenti

La terza sezione propone l'esplorazione della trasmissione di luce attraverso due polaroid allineati con il fascio di luce incidente sul primo. Si propongono tre situazioni esemplari: i due cristalli con gli assi di simmetria paralleli; i due cristalli ruotati di 45° ; i due cristalli inversi (con gli assi di simmetria rispettivamente immagini speculari gli uni degli altri). Le tre situazioni vengono specificamente proposte per essere utilizzate come contesto in cui discutere il nodo dell'impossibilità di attribuire una traiettoria ai fotoni. Sono in ogni caso interessanti come situazioni da proporre come sfide, in un laboratorio di problem solving sperimentale. Hanno una certa rilevanza dal punto di vista storico, visto che fu Newton a proporre esperimenti simili, da un punto di vista applicativo, dato che per esempio il polarizzatore Nichol è basato su esperimenti di questo tipo, dal punto di vista interpretativo, in quanto la sola descrizione della polarizzazione dei fasci trasmessi richiede l'aver costruito un quadro coerente della polarizzazione e in particolare della birifrangenza.

Queste tre situazioni pertanto, per quanto possano essere viste come appendice al percorso, sono di fatto particolarmente rilevanti integrate con esso.

SCHEDA 15 - BR2.1 - L'interazione di luce con due cristalli paralleli. Si mira al riconoscimento della propagazione di due soli fasci la cui separazione è la somma delle separazioni dovute ai singoli cristalli.

SCHEDA 16 - BR2.2 - L'interazione di luce con due cristalli a 45° . L'obiettivo della scheda è il riconoscimento di quattro fasci formati da due coppie di fasci: due con la polarizzazione della luce incidente e due con polarizzazione ad essa ortogonale.

SCHEDA 17 - BR2.3 - L'interazione di luce con due cristalli inversi. In questa situazione i due fasci si ricombinano dando luogo a un unico fascio emergente.

Sezione D - Polarizzazione per riflessione e rifrazione

Le tre schede della sezione propongono l'analisi della polarizzazione della luce riflessa e trasmessa da una o più lamine rifrangenti. Si integrano con le schede e le misure proposte nella sezione B2. Possono essere tralasciate qualora sia stata svolta una esplorazione approfondita con la scheda 3 (polarizzazione nei fenomeni quotidiani).

SCHEDA 18 - PolRifle1 - La polarizzazione per riflessione della luce. Si studia la polarizzazione della luce riflessa da una lamina di vetro o altro materiale rifrangente, per riconoscere il diverso grado di polarizzazione della luce riflessa a diversi angoli.

SCHEDA 19 - PolRifle2 - Riflessione di luce polarizzata. L'esplorazione proposta in questa scheda trova motivazione nella precedente e mira al riconoscimento della dipendenza della intensità di luce riflessa rispetto al piano di riflessione.

SCHEDA 20 - PolRifra - La polarizzazione per rifrazione della luce. La terza scheda propone la situazione complementare alle precedenti, osservando la luce trasmessa da una serie di lamine rifrangenti e riconoscendo la condizione di Brewster. Questa esplorazione si può integrare con la misura dell'angolo di Brewster.

Sezione E - Polarizzazione per diffusione

Due schede affrontano la polarizzazione per diffusione e la diffusione di luce polarizzata.

SCHEDA 24 - PolDif1 - La polarizzazione per diffusione della luce. Si riconosce il diverso grado di polarizzazione della luce diffusa da una soluzione acquosa, secondo diverse direzioni.

SCHEDA 25 - PolDif2 - Diffusione di luce polarizzata. Si riconosce la dipendenza della diffusione dalla direzione della polarizzazione della luce incidente.

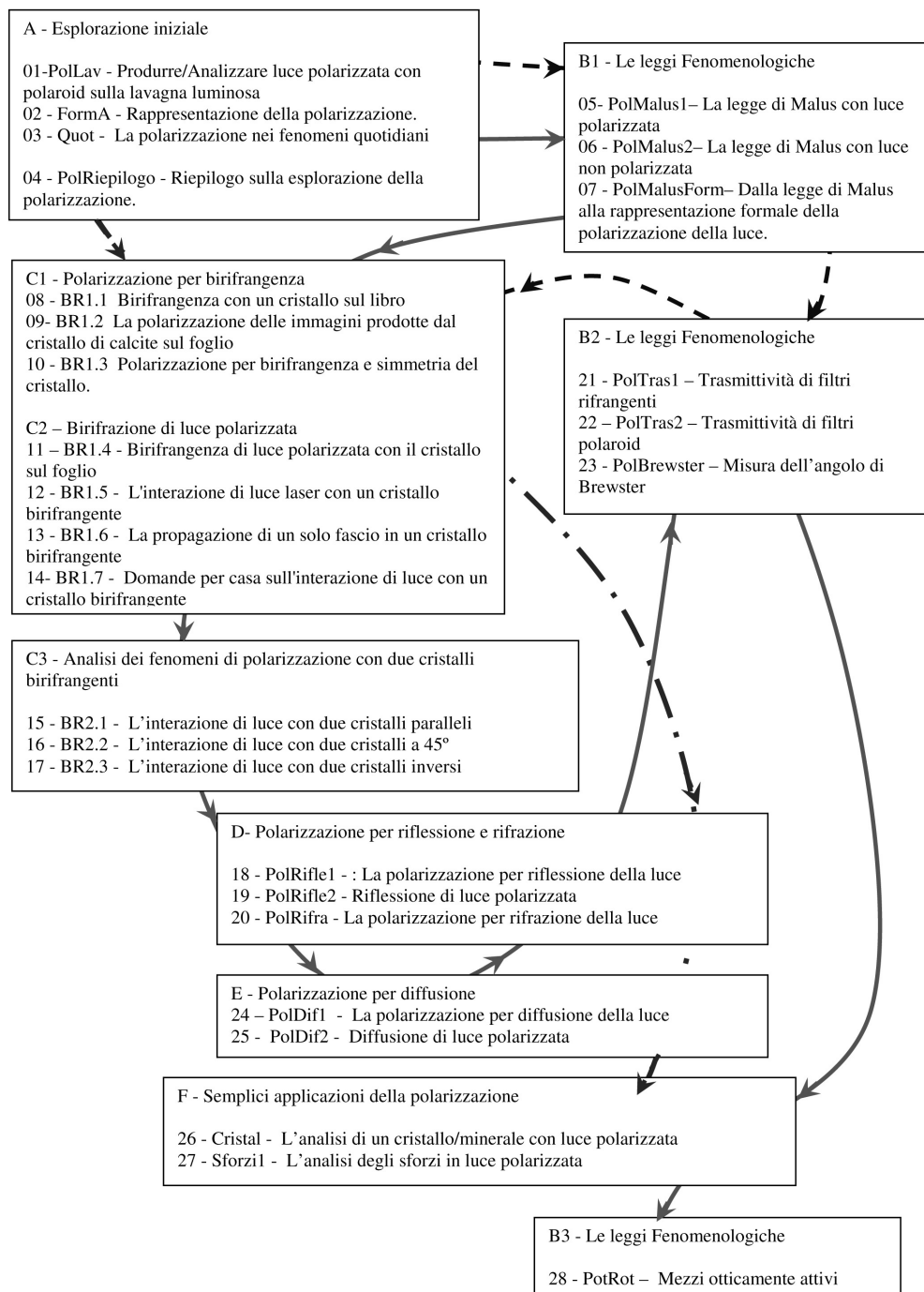
Sezione F - Semplici applicazioni della polarizzazione

Per fornire esemplificazioni delle applicazioni della polarizzazione, oltre all'analisi dei mezzi otticamente attivi (Scheda 28), si propongono due situazioni in questa sezione che si realizzano interponendo a due polaroid incrociati un cristallo, un minerale, un oggetto di plastica trasparente.

SCHEDA 26 - Cristal - L'analisi di un cristallo/minerale con luce polarizzata. Quando si pone un cristallo o un minerale traslucido tra due polaroid incrociati, parte della luce viene trasmessa. Questo esperimento è la base per l'analisi al microscopio in luce polarizzata in cristallografia e mineralogia.


SCHEDA 27 - Sforzi1 - L'analisi degli sforzi in luce polarizzata. Con settaggio analogo al precedente si osserva un oggetto di plastica trasparente (una forchetta) a riposo e sottoponendo i rebbi a sforzo laterale. I colori che si osservano in trasmissione possono essere messi in relazione agli sforzi cui è sottoposto l'oggetto di plastica.

2.2 Mappa delle schede nel percorso di esplorazione della polarizzazione ottica



Scheda 01 - PolLav - Produrre/Analizzare luce polarizzata con polaroid sulla lavagna luminosa

A. Produrre luce polarizzata

<i>Azioni effettuate.</i> Sulla lavagna luminosa...	<i>Osservazioni ed esiti sull'intensità luminosa.</i> L'intensità della luce trasmessa...	<i>Conclusione sull'interazione luce polaroid</i>	<i>Conclusione sulle proprietà della luce incidente sull'i polaroid</i>
A1...appoggio un polaroid 	...si riduce di un fattore costante	Il polaroid interagisce con la luce, che incide su di esso,.....	La luce incidente non manifesta alcuna proprietà particolare
A2...ruoto il polaroid		Il polaroid interagisce con la luce che incide su di esso sempre nello stesso modo,.....	La luce incidente non manifesta alcuna proprietà particolare
A3...appoggio due polaroid sovrapposti			
A4...distanzio i due polaroid e li ruoto solidalmente			
A5...ruoto di un certo angolo uno dei due filtri intorno a un asse verticale			

B Massimi e minimi di trasmissione

Si descriva e illustri come sono stati disposti i due polaroid sovrapposti affinché l'intensità della luce trasmessa sia: massima/minima.

B1. Situazione in cui si ha un massimo		B2. Situazione in cui di ha un minimo	
Descrizione	Illustrazione	Descrizione	Illustrazione

B3.	In quanti casi si ha un...	B3.1 ... <u>massimo</u> di trasmissione? ____	B3.2 ... <u>minimo</u> di trasmissione? ____
B4.	Di che angolo bisogna ruotare il polaroid per passare da una posizione di...	B4.1massimo di trasmissione alla successiva? _____	B4.2 ...minimo di trasmissione alla successiva? _____

B5. Di che angolo bisogna ruotare il polaroid per passare da un massimo di trasmissione al minimo successivo?

C. Intensità della luce trasmessa e angolo formato tra due polaroid

Due polaroid sono appoggiati sulla lavagna luminosa e sovrapposti in modo da avere un massimo di trasmissione.

C1. Si tiene fisso il polaroid posto sulla lavagna luminosa e si ruota l'altro di 360° intorno ad un asse verticale.

Descrivere come varia l'intensità I della luce trasmessa dai due polaroid sovrapposti con l'angolo θ formato dai lati più lunghi?

C2. Si ruota di 360° , intorno ad un asse verticale, il polaroid poggiato sulla lavagna, mantenendo fisso quello posto su di esso.

C2.1 Che cosa cambia rispetto al caso precedente nel modo in cui viene trasmessa la luce dai due polaroid sovrapposti?

C2.2 Come lo si può spiegare? _____

D. Intensità della luce trasmessa e numero di polaroid paralleli

Un polaroid è appoggiato sulla lavagna luminosa. Sopra ad esso vengono disposti, uno alla volta, più polaroid con il lato maggiore parallelo a quello del primo polaroid.

D1. Come varia l'intensità I della luce trasmessa con l'aumentare del numero N di polaroid?

D2. Si ripeta la prova con lastre di vetro brunito. Come varia l'intensità della luce trasmessa in questo caso?

D3. Si confrontino le osservazioni con i polaroid e quelle con le lastre di vetro brunito. Si rilevino analogie e differenze?

D3.1 Analogie	D3.2 Differenze

D4. Riepiloga in che modo agiscono più polaroid paralleli sulla luce che li attraversa.

E. Progettare gli esperimenti

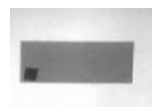
Si vuole caratterizzare quantitativamente come la luce viene trasmessa da due polaroid sovrapposti.

E1. Quali grandezze bisogna misurare?

E2. Come effettueresti le misure?

F. Analisi della polarizzazione della luce

Un polaroid è appoggiato sulla lavagna luminosa.



F1. La luce emessa dalla lavagna luminosa e quella che ha attraversato il polaroid hanno la stessa intensità? _____

F2. Attraverso un polaroid, che viene ruotato di 90° intorno alla direzione di osservazione (in seguito verrà chiamato analizzatore), si osserva la luce emessa dalla lavagna luminosa e quella trasmessa dal polaroid appoggiato su di essa.

F2.1 In quale caso si osserva un cambiamento nella intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, mentre viene ruotato?

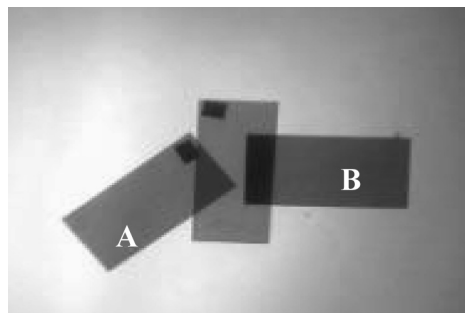
F2.2 La luce emessa dalla lavagna luminosa e quella che ha attraversato il polaroid hanno le stesse proprietà?

Esplicitare la risposta in base a quanto affermato nei punti precedenti.

G. Polarizzazione come proprietà della luce

Quando si ruota un polaroid analizzatore intorno alla direzione di osservazione e cambia l'intensità della luce trasmessa, significa che la luce incidente su di esso possiede una proprietà (polarizzazione). La luce che la manifesta si dice polarizzata (linearmente).

G1. Sulla lavagna luminosa sono appoggiati due polaroid separatamente e disposti con i lati più lunghi non paralleli (per esempio come i polaroid A e B nella figura a lato).



G1.1 Che cosa si osserva, analizzando la luce attraverso un altro polaroid che viene ruotato intorno alla direzione di osservazione (ossia, come detto un analizzatore)?

Quando si osservala luce della lavagna luminosa	L'intensità della luce, osservata attraverso l'analizzatore che viene ruotato,...	<input type="checkbox"/> Cambia <input type="checkbox"/> non cambia	La lucedella lavagna luminosa <input type="checkbox"/> è polarizzata <input type="checkbox"/> non è polarizzata
	...il polaroid A		<input type="checkbox"/> Cambia <input type="checkbox"/> non cambia	trasmessa dal polaroid A <input type="checkbox"/> è polarizzata <input type="checkbox"/> non è polarizzata
	...il polaroid B		<input type="checkbox"/> Cambia <input type="checkbox"/> non cambia		... trasmessa polaroid B <input type="checkbox"/> è polarizzata <input type="checkbox"/> non è polarizzata

G1.2 Che cosa si può concludere in merito alla polarizzazione della luce prodotta da una normale sorgente luminosa?

G1.3 Che cosa si può concludere in merito alla polarizzazione della luce trasmessa da un polaroid, comunque orientato?

G1.4 Quando si osserva ciascuno dei due polaroid, come bisogna orientare l'analizzatore per avere un massimo di trasmissione?

<i>Polaroid osservato</i>	<i>Orientazione del polaroid analizzatore per avere un massimo di trasmissione</i>
Polaroid A	
Polaroid B	

G1.5 Tali orientazioni sono le stesse rispetto a un riferimento fisso nello spazio?

G1.6 Ciascuna di tali orientazioni da che cosa dipende? (barrare una sola lettera)

A	Unicamente dalla orientazione nello spazio del polaroid osservato
B	Unicamente dalla intensità della sorgente
C	Sia dalla orientazione nello spazio del polaroid osservato, sia dalla intensità della sorgente
D	Altro (spiega)

G1.7 Si confrontano la polarizzazione della luce che ha attraversato il polaroid A e quella che ha attraversato il polaroid B.

Sono uguali? Motivare la risposta basandosi sui risultati dei punti G1.1-G1.6.

G1.8 In base ai risultati ottenuti, la polarizzazione della luce è una proprietà che si manifesta:

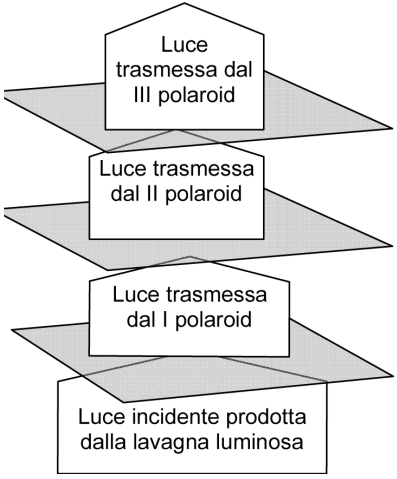
A	Nella direzione di propagazione della luce
B	In direzione ortogonale a quella di propagazione della luce (ossia in una direzione che forma un angolo di 90° con essa)
C	Secondo nessuna direzione particolare
D	Altro (spiegare)

H. Polaroid paralleli e polarizzazione della luce

Un polaroid è appoggiato sulla lavagna luminosa. Si appoggiano su di esso più polaroid, uno sopra all'altro con i lati più lunghi paralleli (massimo di trasmissione). Per ogni polaroid aggiunto si analizza la polarizzazione della luce trasmessa con un polaroid-analizzatore.

H1. Come bisogna orientare l'analizzatore per osservare un massimo di trasmissione nei diversi casi?

Osservazione della luce trasmessa dal:	Orientazione dell'analizzatore per avere un massimo di trasmissione
Primo polaroid	
Secondo polaroid	
Terzo polaroid	



H2. In base al risultato ottenuto che cosa si può dire della polarizzazione della luce trasmessa da ciascuno dei diversi polaroid sovrapposti?

H3. Si confronti per esempio la polarizzazione della luce che incide sul secondo polaroid e la polarizzazione della luce da esso trasmessa. Sono uguali o diverse? Spiega

I. Polaroid ruotati di un angolo α e polarizzazione della luce

Due polaroid, sovrapposti e ruotati di un angolo α uno rispetto all'altro, sono appoggiati sulla lavagna luminosa.

I1.1 La polarizzazione della luce trasmessa dal secondo polaroid è determinata:

- ☐ a) solo dalla orientazione nello spazio del primo polaroid
- ☐ b) solo dalla orientazione nello spazio del secondo polaroid
- ☐ c) dalla orientazione relativa di un polaroid rispetto all'altro.

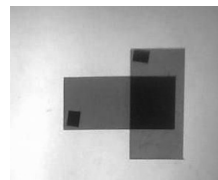
I1.2 Come lo si può riconoscere?_____

I2. L'intensità della luce trasmessa dal secondo polaroid dipende:

- ☐ a) solo dalla orientazione nello spazio del primo polaroid
- ☐ b) solo dalla orientazione nello spazio del secondo polaroid
- ☐ c) dalla orientazione relativa di un polaroid rispetto all'altro.

L. Ruolo dei polaroid nell'interazione con la luce

Due polaroid sono disposti sulla lavagna luminosa, uno sopra all'altro incrociati, come nella immagine a destra.



Previsioni

L1.1 Se si appoggia un terzo polaroid sopra ad essi, che cosa ci si aspetta che accada alla luce trasmessa?

L1.2 Se il terzo polaroid viene inserito in mezzo agli altri due, inclinato di 45° rispetto ad essa che cosa ci si aspetta che accada alla luce trasmessa?

L2. Esperimento

Si effettua ora la prova.

<i>Azioni effettuate</i> Sulla lavagna luminosa...	<i>Osservazioni ed esiti</i> <i>sull'intensità luminosa</i> L'intensità della luce trasmessa....	<i>Confronto con la previsione</i> Analogie/Differenze	<i>Conclusione</i>
<i>L2.1... appoggio un terzo filtro su due filtri incrociati</i>			
<i>L2.2... inserisco un terzo filtro tra due filtri disposti incrociati</i>			
<i>L2.3... ruoto il terzo polaroid intorno ad un asse verticale</i>			

L3.1 Come si comporta un polaroid nell'interazione con la luce?

- ☐ solo come filtro passivo (assorbe semplicemente parte della luce che incide su di esso)
- ☐ solo come un filtro attivo (modifica le proprietà della luce che incide su di esso)
- ☐ sia come filtro attivo, sia come filtro passivo (modifica le proprietà della luce che viene trasmessa e assorbe parte della luce)

L3.2 Motiva la risposta in base alle osservazioni fatte sino ad ora?

Scheda 02 - FormA - Rappresentazione della polarizzazione

Poiché un polaroid viene utilizzato disponendolo ortogonalmente alla direzione di propagazione della luce, per individuare la sua orientazione nello spazio è sufficiente utilizzare un unico versore \mathbf{V} fissato sulla sua superficie, per esempio uno parallelo al lato maggiore.

A1. Nella figura accanto, il lato più lungo del secondo polaroid è ruotato di un angolo θ rispetto a quello del primo. Si disegnino i versori che individuano l'orientazione dei polaroid.

A2. La luce trasmessa da un polaroid acquista una proprietà, ossia è polarizzata

A2.1 Tale proprietà da che cosa dipende?

- ☐ dalla polarizzazione della luce incidente sul polaroid
- ☐ dall'intensità della luce incidente
- ☐ dalla orientazione del polaroid.

A2.2 Tale proprietà è univocamente definita una volta che si conosce il versore che individua la orientazione del polaroid? Spiegare

A3. Alla luce polarizzata trasmessa da un polaroid orientato secondo il versore \mathbf{V} , si può associare un versore \mathbf{v} ad esso parallelo ($\mathbf{v} // \mathbf{V}$).

Un fascio di luce, trasmesso da un polaroid orientato secondo il versore \mathbf{V} , ossia la cui polarizzazione è descritta dal versore \mathbf{v} , incide perpendicolarmente su un polaroid con il lato maggiore orientato secondo il versore \mathbf{W} .

A3.1 Che vettore si potrà associare alla polarizzazione della luce trasmessa dal secondo polaroid?

A3.2 Illustrare la situazione e rappresentare con gli opportuni versori le polarizzazione della luce incidente e quella della luce trasmessa

B1. Come si è visto nella scheda PolLav, l'interazione della luce con un polaroid comporta il considerare due aspetti contemporaneamente: la polarizzazione della luce; la sua intensità.

Con un versore (ossia con una direzione) si può rappresentare la polarizzazione.

Come rappresenteresti anche l'intensità?

☐ Con una vettore la cui lunghezza è tanto più lunga quanto maggiore è l'intensità

☐ Con versori paralleli fra loro in numero proporzionale all'intensità

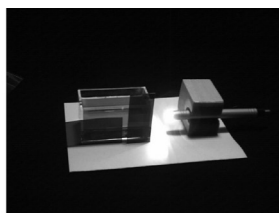
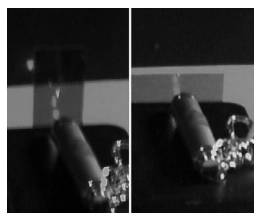
☐ Altro _____

B2. Sulla base della scelta fatta rappresentare intensità e polarizzazione nel caso illustrato nella figura della prima facciata.

Scheda 03 - Quot - La polarizzazione nei fenomeni quotidiani

Con un polaroid si analizza la luce:

- Q1 prodotta da sorgenti diverse (a- lampada a filamento, b- tubo fluorescente al neon, c- puntatore laser...)
- Q2 riflessa o diffusa in riflessione da superfici diverse (a - parete opaca; b - parete lucida; c - marmo di un pavimento; d - formica di un banco; e - vetro di una finestra....)
- Q3 trasmessa da mezzi rifrangenti diversi (a - una o più lamine di vetro, plexiglas; b - l'acqua contenuta in un recipiente a pareti parallele...)
- Q4 diffusa in trasmissione (a - dall'atmosfera terrestre; b - da una soluzione di acqua e sale, c - da acqua e latte..)



A1. Come si deve operare con il polaroid per riconoscere se si ha a che fare con luce polarizzata o meno? _____

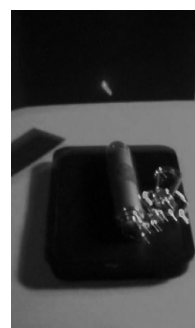
A2. In quali casi pensi di osservare luce polarizzata? (si riportino le sigle aggiungendo eventuali casi a parte)

B. Si effettuino ora le prove.

Si riportino nelle tabelle che seguono le osservazioni effettuate nei diversi casi, aggiungendo almeno altre tre osservazioni aggiuntive non previste.

B1. Sorgenti (Si usino le ultime righe per indicare eventuali altri casi)

<i>Situazione Luce prodotta da.....</i>	<i>Intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, ruotato intorno alla direzione di osservazione</i>	<i>Confronto con le previsioni</i>	<i>Conclusione in merito alla polarizzazione della luce</i>
B1.1 ...una lampada a filamento	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B1.2 ... un tubo fluorescente al neon	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B1.3 ...una fiamma di fiammifero	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B1.4 ...un puntatore laser e raccolta su uno schermo (non intercettare con l'occhio la luce dal laser diretta o riflessa)	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B1.5 ...da una lampada spettroscopica	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B1.6	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B1.7	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B1.8	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		

B1.9 Conclusioni: Quali sorgenti producono luce polarizzata (linearmente)?

B2. Luce riflessa (Si usino le ultime righe per indicare eventuali altri casi)

<i>Situazione Luce riflessa da.....</i>	<i>Intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, ruotato intorno alla direzione di osservazione</i>	<i>Confronto con le previsioni</i>	<i>Conclusione in merito alla polarizzazione della luce</i>
B2.1 un pavimento lucido di: _____	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B2.2 un pavimento lucido di: _____	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B2.3 una finestra	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B2.4 il parabrezza di un'auto	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B2.5 uno specchio piano	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B2.6 una superficie metallica lucida	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B2.7	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B2.8	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B2.9	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		

B2.10 Eventuali altre osservazioni che caratterizzano le situazioni esplorate.

B2.11 Conclusioni: In quali, tra le situazioni considerate, si osserva luce polarizzata (linearmente) per riflessione? _____

B2.12 Quali sono le condizioni che si devono realizzare per osservare polarizzazione per riflessione della luce? _____

B3. Luce rifratta (Si usino le ultime righe per indicare eventuali altri casi)

<i>Situazione Luce rifratta da.....</i>	<i>Intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, ruotato intorno alla direzione di osservazione</i>	<i>Confronto con le previsioni</i>	<i>Conclusione in merito alla polarizzazione della luce</i>
B3.1 una finestra	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B3.2 il parabrezza di un'auto	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B3.3 una lamina di vetro	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B3.4 diverse lamine di vetro sovrapposte	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B3.5 l'acqua contenuta in una vaschetta a pareti sottili e parallele	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B3.6 un cubetto di ghiaccio	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B3.7 una gemma preziosa o un a pietra dura traslucida	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B3.8 un cristallo di calcite tipo spato di Islanda	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		

B3.9 Eventuali altre osservazioni che caratterizzano situazioni specifiche

B3.10 Conclusioni: In quali, tra le situazioni considerate, si osserva luce polarizzata (linearmente) per rifrazione?

B3.11 Quali sono le condizioni, che si devono realizzare per osservare polarizzazione per rifrazione della luce?

B4. Luce diffusa (Si usino le ultime righe per indicare eventuali altri casi)

<i>Situazione Luce diffusa da.....</i>	<i>Intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, ruotato intorno alla direzione di osservazione</i>	<i>Confronto con le previsioni</i>	<i>Conclusione in merito alla polarizzazione della luce</i>
B4.1 una soluzione di acqua e sale	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B4.2 un miscuglio di acqua e latte	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B4.3 l'atmosfera	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B4.4 l'acqua contenuta in una vaschetta a pareti sottili e parallele	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B4.5 il fumo prodotto da una bacchetta di incenso	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B4.6	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		
B4.7	<input type="checkbox"/> varia <input type="checkbox"/> non varia		

B4.8 Eventuali altre osservazioni che caratterizzano specifiche situazioni osservate

B4.9 Conclusioni: In quali, tra le situazioni considerate, si osserva luce polarizzata (linearmente) per rifrazione?

B4.10 Quali sono le condizioni, che si devono realizzare per osservare polarizzazione per rifrazione della luce?

Scheda 04 - PolRiepilogo - Riepilogo sulla esplorazione della polarizzazione

Rispondere alle seguenti domande basandosi sulle osservazioni fatte sino ad ora con i polaroid disposti sulla lavagna luminosa (Scheda1-PolLav) e su quelle effettuate nelle diverse situazioni della quotidianità in cui si osserva luce polarizzata (Scheda2 PolQuot).

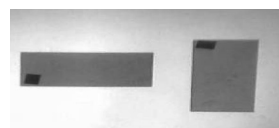
A1. Si consideri una ordinaria sorgente luminosa, come le lampade a filamento o i tubi al neon.

A1.1 La luce da essa prodotta è: ☐ polarizzata ☐ non-polarizzata

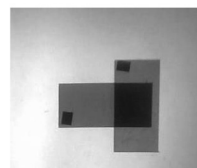
A1.1 Come ci si può accorgere? _____

A2. Un polaroid è appoggiato sulla lavagna luminosa. Confronta la luce trasmessa dal polaroid e quella che incide su di esso.

A2.1 Per quali proprietà differiscono?



A3. Come si può analizzare la polarizzazione (lineare) di un fascio di luce?



A4. Due polaroid sono sovrapposti uno all'altro sulla lavagna luminosa

A4.1 Da che cosa dipende l'intensità della luce trasmessa dai due polaroid?

A4.2 In che modo? _____

A4.3 Tale intensità dipende dalla polarizzazione della luce incidente? Spiega

A5. Quali grandezze è necessario misurare per analizzare quantitativamente come la luce interagisce con due polaroid?

A6. Come varia l'intensità della luce trasmessa con l'aumentare del numero di polaroid paralleli sovrapposti? _____

A7. Due polaroid sono sovrapposti.

A7.1 In quale situazione si ha un massimo di trasmissione?

A7.1.2 In quale situazione si ha un minimo di trasmissione?

A7.3 Di quanto bisogna ruotare i polaroid per passare da una situazione all'altra?

A8. Quali aspetti caratterizzano la polarizzazione della luce trasmessa da un polaroid?

A8.1 È una proprietà: ☐ scalare ☐ vettoriale

A8.2 È una proprietà che:

☐ dipende dall'intensità della luce incidente

☐ non-dipende dall'intensità della luce incidente

A8.3 È una proprietà che si manifesta

☐ nella stessa direzione della direzione in cui si propaga la luce

☐ in direzione ortogonale alla direzione in cui si propaga la luce

A9. Un polaroid intercetta perpendicolarmente un fascio di luce. Il modo in cui polarizza la luce (ossia quale proprietà conferisce alla luce) può essere descritto:

☐ individuando la orientazione del polaroid con una direzione perpendicolare alla sua superficie

☐ Individuando il polaroid con una direzione parallela alla sua superficie

☐ In un altro modo (quale) _____

A10. Se più polaroid sono allineati con un fascio luminoso, quando si ha sicuramente un minimo di trasmissione?

☐ Quando due polaroid anche non consecutivi sono incrociati

☐ Solo quando due polaroid consecutivi sono incrociati

☐ altro (specificare) _____

A11. Fra due polaroid incrociati si inserisce un terzo polaroid a 45° . L'intensità della luce trasmessa:

☐ Resta uguale

☐ Cresce

☐ Decresce

A12. Come si comporta un polaroid nell'interazione con la luce?

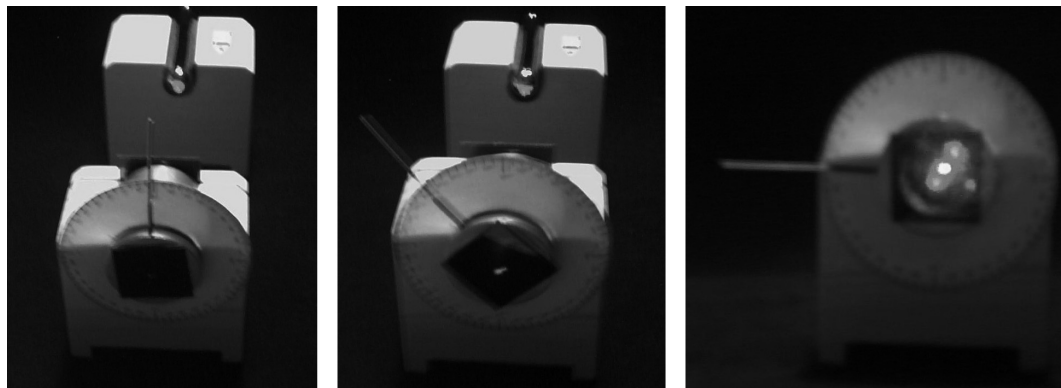
☐ solo come filtro passivo (assorbe semplicemente parte della luce che incide su di esso)

☐ solo come un filtro attivo (modifica le proprietà della luce che incide su di esso)

☐ sia come filtro attivo, sia come filtro passivo (modifica le proprietà della luce che viene trasmessa e assorbe parte della luce)

Scheda 05 - PolMalus1– La legge di Malus con luce polarizzata

Si allineano un puntatore laser, due polaroid su supporto ruotante, un sensore di luce. Si acquisisce l'intensità luminosa misurata dal sensore al variare dell'angolo α , di cui si ruota il secondo polaroid rispetto al primo, a partire dalla posizione per cui si ha un massimo di trasmissione ($\alpha=0^\circ$) e fino alla posizione di massimo successiva ($\alpha=180^\circ$).



A. Attività preliminari

A1. Calibrazione del sensore

Si dispongono il sensore e il laser a circa 50 cm tra loro. Si inserisce il supporto ruotante con i due polaroid paralleli (massimo di trasmissione), in modo che ciascuno di essi intercetti il fascio di luce. Si calibra il sensore con: valore massimo pari a quello dell'insensibilità trasmessa; valore minimo quello che si acquisisce oscurandolo con un dito.

Effettuata la calibrazione si riduce leggermente l'intensità della luce generata dalla sorgente, ovvero la si allontana leggermente dal sensore. In ogni caso l'intensità luminosa trasmessa deve essere sufficientemente elevata rispetto al rumore e inferiore al limite di saturazione del sensore.

A2. Stima dell'indeterminazione sulla misura

Si acquisisca per qualche decina di secondi l'intensità di luce, quando si ha un massimo di trasmissione. Si stimino il valore medio I dell'intensità rilevata (in u.a.), la sua indeterminazione assoluta ΔI (in u.a.) e relativa $I / \Delta I$ (in %) e se ne riportano qui i valori:

$I =$ _____ $\Delta I =$ _____ $I / \Delta I =$ _____

A3. Stima della intensità di fondo

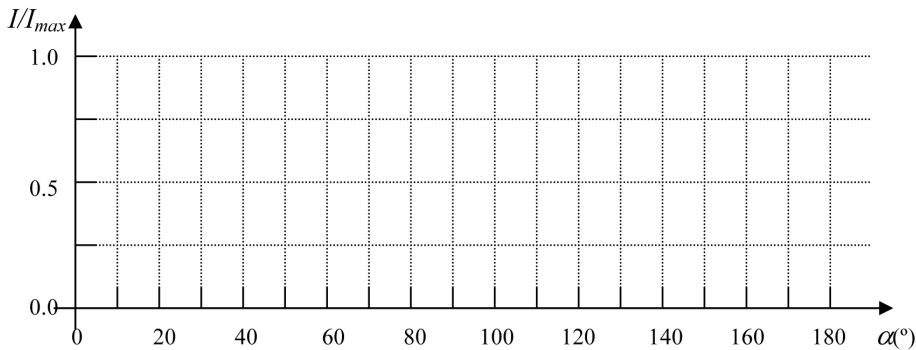
Intensità del fondo di luce che incide sul sensore quando il laser è spento	$I_{\text{fondo}} =$ _____
---	----------------------------

C2. In alternativa si possono riportare i dati in una tabella costruita su foglio elettronico, in modo analogo a quanto rappresentato nella figura sottostante, in cui è rappresentato il foglio Malus del file: elaborazione_dati_esperimenti.xls)

Microsoft Excel - Elaborazione_dati_esperimenti										
File Edit View Insert Format Tools Data Window Help										
B17										
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1										
2										
3	$\pi/180=$	0,017453								
4										
5	$I_{max}=$	1		$\alpha (^{\circ})$	I (u.a.)	I/I_{max}		$\cos^2 (\alpha)$		I/I_{max}
6						$=F7/\$B\5		$=(\text{COS}(\$B\$3*(E7+\$B\$8)))^2$		$=F7$
7				90		0		0,0003		0
8	$\beta (^{\circ}) =$	1								
9										

C3. Con i dati rilevati si costruisca la colonna I/I_{max} e quindi si rappresenti il grafico I/I_{max} in funzione di α .

Il grafico può essere rappresentato nel diagramma sottostante a mano, oppure costruito con gli strumenti disponibili nel foglio elettronico (si alleggi una stampa alla presente scheda).



D. Confronto

Si confronti l'andamento ottenuto con quello previsto, illustrando analogie e differenze.

<p>Analogie</p>	<p>Differenze</p>

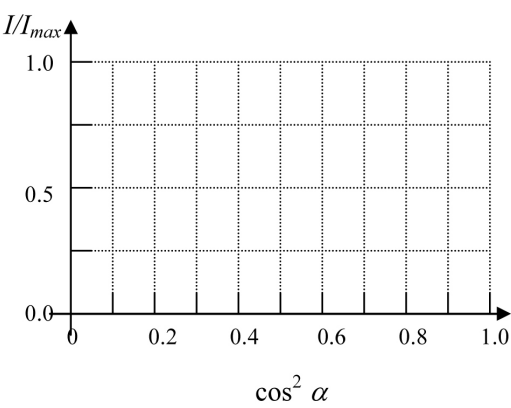
E. Elaborazione dei dati

E1. Si indichi che tipo di curva può rappresentarli meglio.

E2. Per $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ o $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, si costruisca il grafico di I/I_{\max} in funzione di $\cos^2 \alpha$ rappresentandolo a mano nel diagramma a destra, oppure utilizzando gli strumenti del foglio elettronico (allegare una stampa del grafico alla scheda).

E3. Si interpolino linearmente i dati.

E4. Qualora il grafico di I/I_{\max} in funzione di $\cos^2 \alpha$ sia oscillante intorno alla retta interpolante, significa che vi è un errore sistematico nei dati di α , dovuto al non perfetto allineamento iniziale dei due polaroid. Si corregga l'angolo α per tener conto di tale errore sistematico.



E5. Si riporti l'equazione che rappresenta tale interpolazione (si riporti eventualmente anche il coefficiente di correlazione R^2 o il valore di χ^2).

F. Conclusioni

F.1 Quali conclusioni si possono trarre dai risultati ottenuti?

F.2 Su un polaroid incide il fascio di intensità I_o di un raggio laser. Il polaroid ha coefficiente di trasmissione $T = I_{\max}/I_o$ (con intensità massima trasmessa) e forma un angolo α , con la polarizzazione del fascio laser. In base ai risultati ottenuti si indichi l'espressione che rappresenta l'intensità trasmessa in funzione di α :

$$I(\alpha) = \text{_____} \text{ (legge di Malus)}$$

F2.1 Quali fenomeni sono caratterizzati dal coefficiente T ? _____

F2.2 Il suo valore sperimentale è:

- ☐ Sempre maggiore di 1 ☐ Sempre minore di 1 ☐ Sempre uguale a 1

Si motivi la risposta: _____

F2.3 Quali fenomeni caratterizza il fattore $\cos^2 \alpha$? _____

Scheda 06 - PolMalus2– La legge di Malus con luce non polarizzata

Due polaroid su supporto ruotante e un sensore di luce sono allineati con il fascio di una torcetta elettrica tipo penlight. Si acquisisce l'intensità luminosa misurata dal sensore al variare dell'angolo α , di cui si ruota il secondo polaroid rispetto al primo, a partire dalla posizione per cui si ha un massimo di trasmissione ($\alpha=0^\circ$) e fino alla posizione di massimo successiva ($\alpha=180^\circ$).

A. Attività preliminari.

A1. Calibrazione del sensore

Si dispongono il sensore e la sorgente luminosa a circa 50 cm tra loro. Se necessario si focalizza il fascio sul sensore con una lente convergente. Si calibra il sensore con: valore massimo pari a quello dell'intensità massima trasmessa dai polaroid in questa situazione; valore minimo quello che si acquisisce oscurandolo con un dito.

Effettuata la calibrazione si riduce leggermente l'intensità della luce generata dalla sorgente, ovvero si lo si allontana leggermente dal sensore. In ogni caso l'intensità luminosa trasmessa deve essere sufficientemente elevata rispetto al rumore e inferiore al limite di saturazione del sensore.

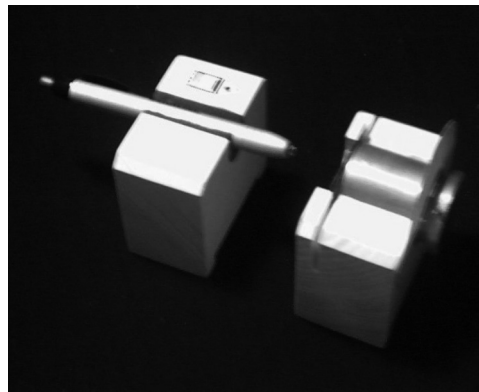
A2. Stima dell'indeterminazione sulla misura

Si acquisisca per qualche decina di secondi l'intensità di luce, quando si ha un massimo di trasmissione. Si stimino il valore medio I dell'intensità rilevata (in u.a.), la sua indeterminazione assoluta ΔI (in u.a.) e relativa $I / \Delta I$ (in %) e se ne riportano qui i valori:

$I =$ _____ $\Delta I =$ _____ $I / \Delta I =$ _____

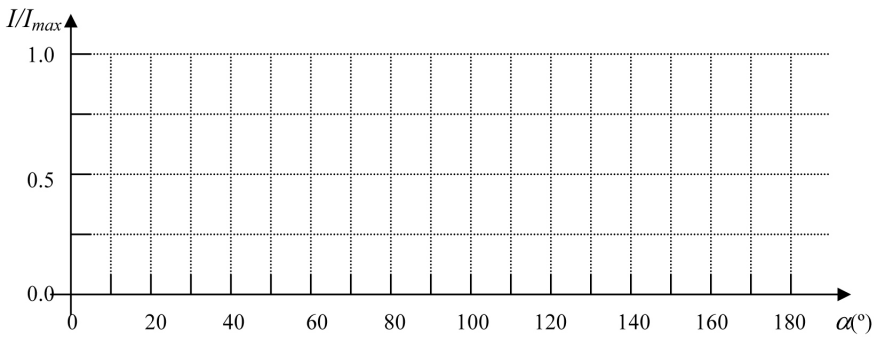
A3. Stima della intensità di fondo

Intensità del fondo di luce che incide sul sensore quando la torcetta elettrica è spenta.	$I_{fondo} =$ _____
---	---------------------



C3. Con i dati rilevati si costruisca la colonna I/I_{max} e quindi si rappresenti il grafico I/I_{max} in funzione di α .

Il grafico può essere rappresentato a mano, nel diagramma sottostante, oppure costruito con gli strumenti disponibili nel foglio elettronico (si alleggi una stampa alla presente scheda).



D. Confronto con le previsioni

Si confronti l'andamento ottenuto con quello previsto in **A1.2**, illustrando analogie e differenze.

Analogie	Differenze

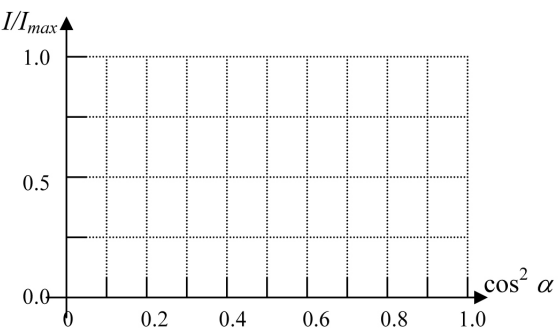
E. Elaborazione dei dati

E1. Si indichi che tipo di curva può rappresentarli meglio.

E2. Si costruisca il grafico di I/I_{max} in funzione di $\cos^2 \alpha$, rappresentandolo a mano nel diagramma a destra, oppure utilizzando gli strumenti del foglio elettronico (allegare una stampa del grafico alla scheda).

E3. Si interpolino linearmente i dati

E4. Qualora il grafico di I/I_{max} in funzione di $\cos^2 \alpha$ sia oscillante intorno alla retta interpolante, significa che vi è un errore sistematico nei dati di α , dovuto al non perfetto allineamento iniziale dei due polaroid. Si corregga l'angolo α per tener conto di tale errore sistematico.



E5. Si riporti l'equazione che rappresenta tale interpolazione (si riporti eventualmente anche il coefficiente di correlazione R^2 o il valore di χ^2).

--

F. Confronto con il caso della sorgente laser

Si confrontino i risultati ottenuti con luce bianca non polarizzata e quelli ottenuti con luce laser polarizzata (nell'attività prevista nella scheda PolMalus1).

F1. Si costruiscano nei due diagrammi sottostanti (o in due diagrammi su foglio elettronico, allegandone stampa alla scheda) i grafici dell'intensità I/I_{\max} in funzione di α e di $\cos^2\alpha$.

F2. Per quali aspetti i risultati nei due casi sono uguali/simili e per quali aspetti sono diversi?

Aspetti uguali/simili	Aspetti diversi

F3. Si confrontino i risultati ottenuti con le previsioni (**A1.4**). Si discutano analogie e differenze

Analogie	Differenze

F4. Sussiste una relazione lineare tra I/I_{\max} e $\cos^2\alpha$, anche nel caso di luce bianca? ☐ Sì ☐ No

Motivare la risposta _____

F5. Come lo si può spiegare? _____

G. Conclusioni

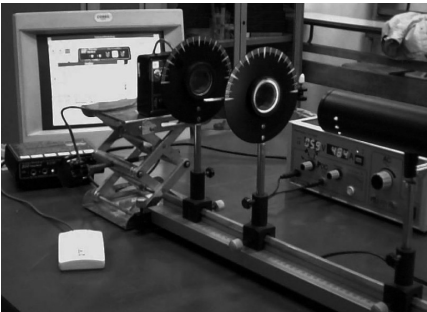
G1. Si sintetizzino i risultati ottenuti in questa scheda per caratterizzare come un polaroid interagisce con luce bianca (polarizzata) e con luce laser incidente su di esso, generalizzando le conclusioni della scheda PolLav1.

--

Scheda 07 - PolMalusForm – Dalla legge di Malus alla rappresentazione formale della polarizzazione della luce

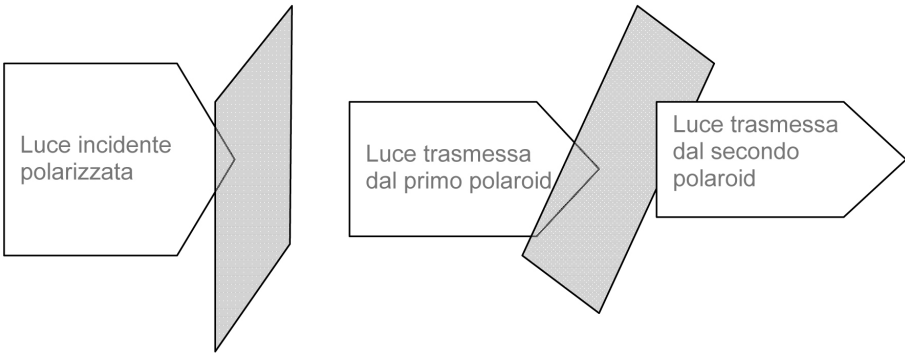
A. Due polaroid, di coefficiente di trasmissione T , sono allineati con il fascio di una sorgente laser di luce polarizzata di intensità I_o . Il primo polaroid è orientato in modo da avere un massimo di trasmissione della luce incidente. I due polaroid sono ruotati uno rispetto all'altro di un angolo α .

A1.1 Si indichino intensità e polarizzazione: della luce incidente; di quella trasmessa dal primo polaroid, di quella trasmessa dal secondo polaroid.



	Luce incidente	Luce trasmessa dal primo polaroid	Luce trasmessa dal secondo polaroid
Intensità	I_o		
Polarizzazione			

A1.2 Si rappresentino nella figura sottostante i versori che individuano i polaroid e la polarizzazione della luce trasmessa da ciascuno dei due polaroid.



B1. Si ricordi che il prodotto scalare di due vettori è pari al prodotto dei moduli per il coseno dell'angolo fra essi compreso.

B1.1 Quanto vale il prodotto scalare tra i versori che rappresentano la polarizzazione della luce?

B1.2. Come si può esprimere la legge di Malus per mezzo di tale prodotto scalare?

C1. Quando un fascio di luce non-polarizzata, di intensità I_o , incide su un polaroid viene trasmessa una parte di intensità I_t e una parte, di intensità I_a , non viene trasmessa.

C1.1 A quanto deve essere uguale la somma: $(I_t/I_o) + (I_a/I_o) =$ _____

C1.2 Per quale motivo? _____

C1.3 Sperimentalmente (si vedano i risultati della scheda PolTrasm) quanto valgono i due seguenti rapporti?

$$(I_t/I_o) = \underline{\hspace{2cm}} \quad (I_d/I_o) = \underline{\hspace{2cm}}$$

D1. Si possono ottenere tali valori anche considerando un fascio di luce non polarizzata come dato dalla sovrapposizione (incoerente) di componenti di luce polarizzata secondo tutte le direzioni.

D2. Procedura semplificata

D2.1 Per ciascuna componente, ossia per un definito angolo α :

la frazione di luce <u>trasmessa</u> dal polaroid risulta uguale a: _____	la frazione di luce <u>non-trasmessa</u> dal polaroid risulta uguale a: _____
--	--

D2.2 Per la componente corrispondente all'angolo $\beta = 90^\circ - \alpha$,

la frazione di luce <u>trasmessa</u> dal polaroid risulta uguale a: _ _____	la frazione di luce <u>non-trasmessa</u> dal polaroid risulta uguale a: _____
--	--

D2.3 La loro somma risulta uguale a:

luce <u>trasmessa</u> : _____	luce <u>non-trasmessa</u> : _____
-------------------------------	-----------------------------------

D2.4 La loro media risulta uguale a:

luce <u>trasmessa</u> : _____	luce <u>non-trasmessa</u> : _____
-------------------------------	-----------------------------------

D2.5 Che conclusione si può trarre per l'insieme di tutte le componenti?

D3. Procedura completa

D3.1 $d\alpha/2\pi \cos^2\alpha$ è il contributo alla luce trasmessa della componente della luce incidente con direzione della polarizzazione compresa tra α e $\alpha+d\alpha$.

D3.2 La somma di tutti i contributi (l'integrale) è uguale a:

E. Conclusioni

In base ai risultati ottenuti formalizzare le conclusioni sull'interazione di luce con polaroid.

E1. Un fascio di luce non polarizzata di intensità I_o incide su un polaroid con coefficiente di trasmissione T e orientato secondo il versore \mathbf{V} .

La luce trasmessa ha: intensità: _____ polarizzazione: _____

E2. Un fascio di luce di intensità I_o e polarizzazione \mathbf{v} incide su un polaroid con coefficiente di trasmissione T e orientato secondo il versore \mathbf{W} .

La luce trasmessa ha: intensità: _____ polarizzazione: _____

Scheda 08 - BR1.1 Birifrangenza con un cristallo sul libro

A. Esplorazione _____

A1. Si appoggia un cristallo di calcite (tipo spato di Islanda) sulla pagina scritta di un libro.

Quante immagini delle scritte si osservano? _____

A2. Si ruota di un piccolo angolo ($<30^\circ$) il cristallo, lasciando la stessa faccia sulla pagina.

Si descriva, eventualmente servendosi anche di una illustrazione, che cosa accade alle immagini osservate.



A3. Come spiegheresti a un tuo compagno ciò che si osserva? _____

A4 Ruota ora il cristallo, appoggiandolo con le altre facce sulla pagina del libro.

A4.1 Quante immagini osservi nei diversi casi? _____

A4.2 Rilevi differenze a seconda della faccia appoggiata sulla pagina del libro? ☐ Sì ☐ No

Se sì, quali? _____

A5. Si appoggi sul libro un blocchetto di plexigla o vetro.

A5.1 Quante immagini si osservano? _____

A5.2 Se si ruota il blocchetto, ruota anche l'immagine? _____

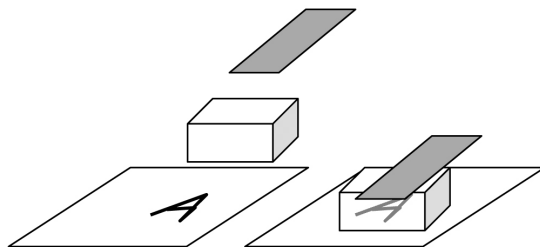
B. Conclusioni

B1. In base a queste semplici osservazioni si descriva il fenomeno osservato, che prende il nome di birifrangenza.

B2. Come si può differenziare il processo di birifrazione, che si ha per esempio quando la luce incide su un cristallo birifrangente come la calcite, da quello dell'ordinaria rifrazione, che si ha per esempio quando la luce incide su una lamina di vetro, plexiglas o altro materiale rifrangente?

Scheda 09 - BR1.2 La polarizzazione delle immagini prodotte dal cristallo di calcite sul foglio

Si pone un polaroid sopra ad un cristallo di calcite, appoggiato sulla lettera scritta su un foglio. Attraverso il polaroid si osservano le immagini della lettera.

**A. Previsioni**

A1. In che modo si prevede che verrà modificata l'intensità delle immagini della lettera a causa

dalla presenza del polaroid? _____

A2. Si prevede che cambierà il numero di immagini che osservate? _____

A3 Si ruota il polaroid, mantenendolo sopra la stessa faccia del cristallo.

A3.1 In che modo ci si aspetta che cambi l'intensità delle immagini che si osservano attraverso il cristallo?

A3.2 Ci si aspetta che cambi il numero di immagini della lettera, che si osservano? Spiegare

B. Esperimento

B1 Che cosa si osserva attraverso il polaroid posto sopra al cristallo? _____

B2 Si ruota il polaroid mantenendolo sopra al cristallo.

B2.1 Cambia l'intensità delle immagini che si osservano? ☐ Sì ☐ No

B2.2 Cambia il numero di immagini che si osservano? ☐ Sì ☐ No

B2.3 Si descriva ciò che si è osservato _____

C. Confronto

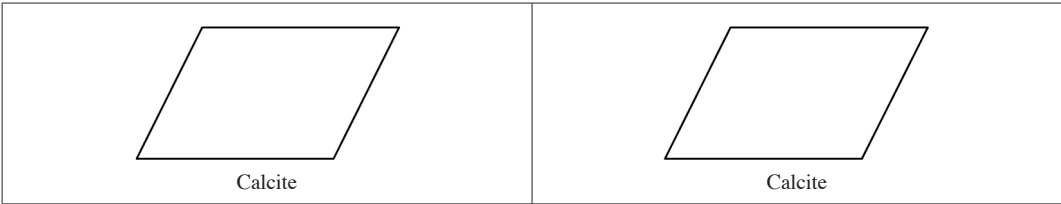
C1 Confronta le previsioni redatte nella parte **A**, con le osservazioni riportate nella parte **B**.
Discuti analogie e differenze

Analogie	Differenze

D. Analisi della polarizzazione

D1. Si ruotino i polaroid fino a che si ottiene una sola immagine.

D1.1 Illustra le situazioni che hai realizzato per ottenere una sola immagine trasmessa dal polaroid (il cristallo è visto dall'alto)



D1.2 Commenta le illustrazioni con una breve spiegazione.

--	--

D1.3 Di che angolo bisogna ruotare il polaroid per passare da una situazione all'altra? _____

D1.4 Come si può spiegare questo fatto? _____

D2. Le immagini della lettera, prodotte dal cristallo, sono generate da fasci di luce diversi.

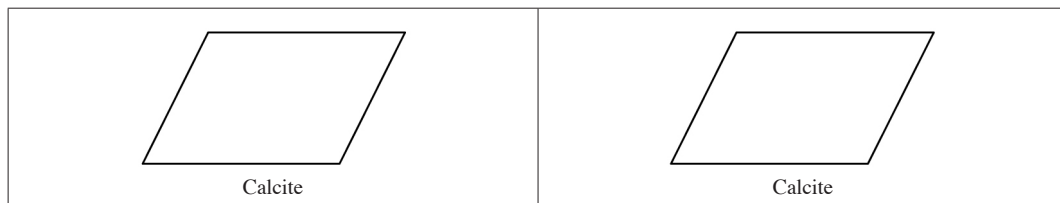
D2.1 Dalle osservazioni fatte, puoi concludere che tali fasci sono polarizzati? ☐ Sì ☐ No

D2.2 Come lo si fa a capire? _____

D2.3 Che cosa si può concludere sulla polarizzazione di questi fasci?

E. Rappresentazione formale

E1. Negli spazi sottostanti (in cui il cristallo è visto dall'alto) si disegnino i vettori con cui si può descrivere la polarizzazione della luce, che forma le immagini prodotte dal cristallo di calcite.



E2. Si spieghino le illustrazioni.

--	--

E3. Quale angolo formano i vettori che caratterizzano la polarizzazione della luce delle due immagini?

F. Conclusioni.

F.1 In base alle osservazioni fatte, si riepilogano le conclusioni sulla polarizzazione dei fasci di luce che si trasmettono in un cristallo birifrangente.

Scheda 10 - BR1.3 Polarizzazione per birifrangenza e simmetria del cristallo

Sopra a un cristallo si appoggia un polaroid. Si ruota il cristallo di calcite. Con il polaroid appoggiato su di esso si analizza la polarizzazione della luce che ha attraversato il cristallo.

A. Previsioni

A1. Ci si aspetta di osservare dei cambiamenti rispetto al caso osservato nella scheda BR1.2?

☐ Sì ☐ No

A2. Quali aspetti risulteranno cambiati? _____

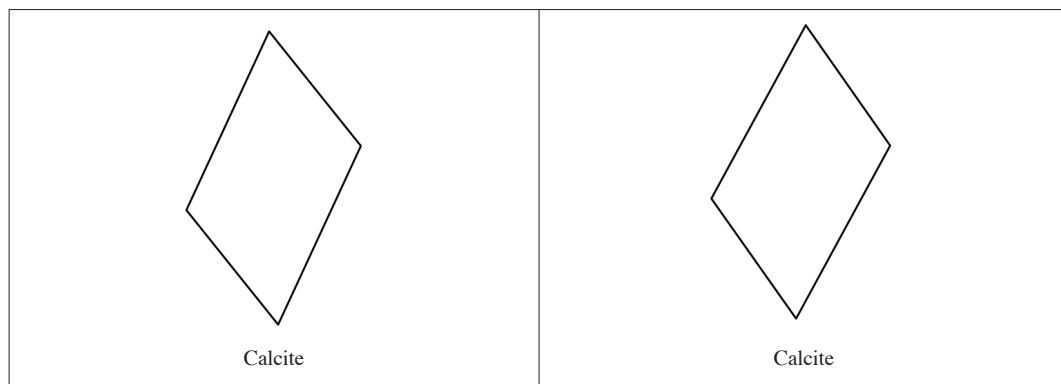
A3. Quali aspetti risulteranno gli stessi? _____

A4. Si motivino le risposte _____

B. Esperimento

Si effettui ora la prova.

B1. Si illustrino le situazioni realizzate in cui è stata osservata una sola immagine trasmessa dal polaroid, quando il cristallo è stato ruotato come in figura (visto dall'alto).



B2. Si spieghino le illustrazioni.

--	--

C. Confronto

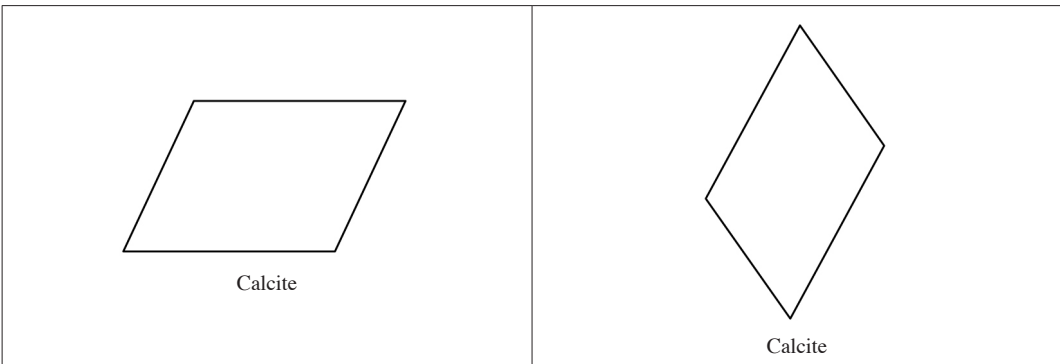
C1. Si confrontino le previsioni con le osservazioni effettuate. Si discutano analogie e differenze

Analogie	Differenze
----------	------------

D. Polarizzazione

D1. Si confrontino le due situazioni esplorate e raffigurate nelle due figure sottostanti.

Si illustrino nelle figure, come sono correlate le polarizzazioni dei fasci di luce che si propagano nel cristallo e la disposizione del cristallo stesso



D2. Si descriva a parole tale correlazione _____

D3. Le polarizzazioni dei fasci che si propagano nel cristallo dipendono in qualche modo dalle direzioni degli assi di simmetria del cristallo? Motivare/illustrare la risposta.

E. Conclusioni

Si riepilogano le conclusioni ottenute rispondendo alle seguenti domande

E1. In un cristallo birifrangente quanti fasci si propagano in genere? _____

E2. Che polarizzazione hanno? _____

E3. Come sono correlate tali polarizzazioni alla disposizione del cristallo nello spazio?

E4. Come sono correlate tali polarizzazioni agli assi di simmetria del cristallo?

E5. Sintetizzare la conclusione generale che si può trarre dalle osservazioni fatte.

Scheda 11 - BR1.4 - Birifrangenza di luce polarizzata con il cristallo sul foglio

Parte 1. Un cristallo birifrangente è appoggiato su un foglio su cui è disegnato un puntino rosso. Sotto al cristallo viene inserito un polaroid.

A. Previsioni

A1. Che cosa ti aspetti di osservare?

A2. Si ruota il cristallo lasciandolo sempre appoggiato sul polaroid e mantenendo quest'ultimo fermo.

A2.1 Cambieranno le intensità delle immagini del puntino rosso, ruotando il cristallo? Sì; No

A2.2 Vi saranno delle posizioni in cui si osserverà una sola immagine?

No.	Motivazione
Sì. Quali? _____	Motivazione

A2.3 Vi saranno delle posizioni in cui si osserveranno entrambe le immagini del puntino con la stessa intensità?

No.	Motivazione
Sì. Quali? _____	Motivazione

A2.4 Esplicita il ragionamento che ti ha guidato nel formulare le tue previsioni.

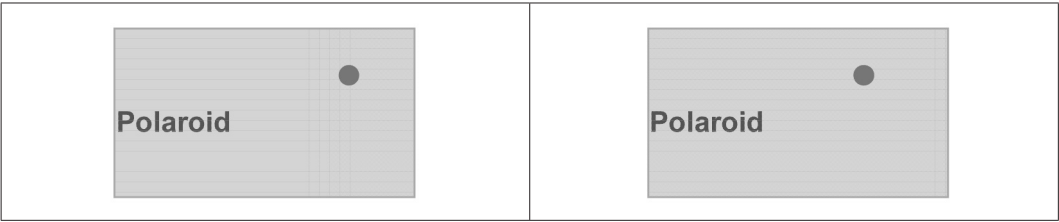
B. Esperimento. Effettua ora la prova

Si mantiene fisso il polaroid sopra al puntino rosso disegnato su un foglio. Si ruota il cristallo mantenendo con la stessa faccia sopra di esso.

B1. Descrivere/illustrare come cambiano le immagini che si osservano.

B2. Individuare le posizioni per cui una delle due immagini scompare.

B2.1 Illustrare, nelle figure sottostanti, le posizioni del cristallo per cui si ottiene una sola immagine (polaroid e cristallo sono osservati dall’alto)



E2.2 Completare le illustrazioni con una breve descrizione.

--	--

B2.3 Come spiegare ciò che si osserva nelle situazioni realizzate

B3. Disporre il polaroid in modo che si osservino contemporaneamente entrambe le immagini del puntino rosso e che queste abbiano la stessa intensità.

Illustrare una delle situazioni realizzate	Descrivere la situazione raffigurata
Spiegare la situazione raffigurata	

C. Confronto

Confrontare le osservazioni effettuate e le previsioni.

C1. Individuare analogie e differenze

Analogie	Differenze
----------	------------

C2. Motivare le analogie e le differenze rilevate

--

C3. Alla luce del confronto effettuato:

C3.1 Si ritiene sia ancora valido il ragionamento (esplicitato nel punto **A2.4**) su cui sono state formulate le previsioni?

sì, perché _____

no. Come le modifichereesti _____

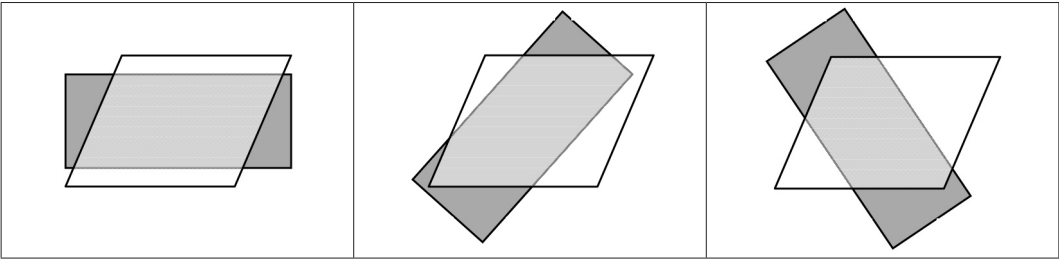
Scheda BR1.4 - Parte 2

Si dispone un cristallo di calcite, sopra a un polaroid che copre il puntino rosso disegnato su un foglio.

Con un secondo polaroid si analizza la polarizzazione delle immagini del puntino.

A. Previsioni

A1. Completare le figure sottostanti con il numero di immagini del puntino rosso che effettivamente si osservano in ciascuno dei tre casi proposti.



A2. Che cosa si prevede di osservare attraverso il polaroid analizzatore nelle tre situazioni illustrate:

--	--	--

A3. Motivare le risposte date

--	--	--

B. Esperimento. Effettua ora la prova.

B1. In ciascuna delle tre situazioni, che cosa osservi attraverso il polaroid analizzatore quando lo ruoti intorno alla direzione di osservazione?

--	--	--

B2. Come devi disporre l'analizzatore per osservare lo stesso numero di immagini che si osservano quando ci sono solo il primo polaroid e il cristallo?

--	--	--

C. Confronto

C1. Confronta le previsioni con le osservazioni effettuate. Discuti analogie e differenze

Analogie	Differenze

D. Polarizzazione

D2. Nelle tre situazioni illustrate la luce che incide sulla faccia inferiore del cristallo è polarizzata?

☐ Sì ☐ No

D3. Che cosa puoi dire della polarizzazione della luce incidente quando nel cristallo si propaga uno solo dei due fasci?

--	--

D4. Che cosa puoi dire della polarizzazione della luce incidente quando nel cristallo si propagano due fasci di uguale intensità?

D5. L'intensità dei fasci, che si trasmettono nel cristallo ed emergono da esso, dipendono dalla polarizzazione della luce, che incide sul cristallo? ☐ Sì ☐ No

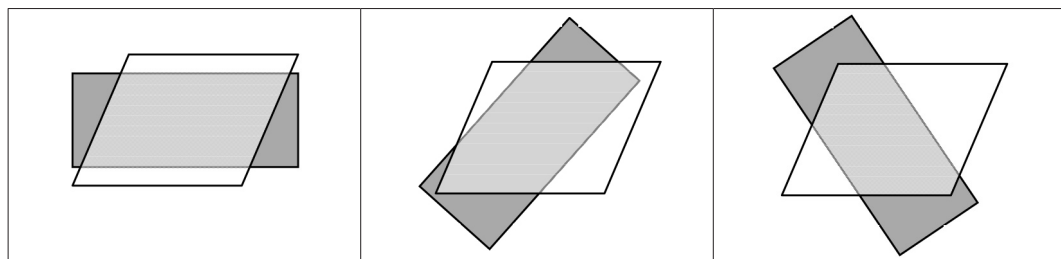
D5.1 Come ce ne accorgiamo? _____

D6. La polarizzazione dei fasci, che si trasmettono nel cristallo ed emergono da esso, dipendono dalla polarizzazione della luce, che incide sul cristallo? ☐ Sì ☐ No

D6.1 Come ce ne accorgiamo? _____

E. Rappresentazione formale

E1. Negli spazi sottostanti si disegnano i vettori con cui si può descrivere la polarizzazione della luce che forma le immagini prodotte dal cristallo di calcite nei tre casi.



F. Conclusioni.

F1. Dalle osservazioni fatte, che cosa si può concludere sul modo con cui la luce polarizzata interagisce con un cristallo birifrangente?

Scheda 12 - BR1.5 - L'interazione di luce laser con un cristallo birifrangente

Il fascio di luce polarizzata di un puntatore laser incide su un cristallo birifrangente (calcite tipo spato d'Islanda).

Si intercettano su uno schermo i fasci che emergono dal cristallo

**A Previsioni**

A1. Quanti fasci si prevede di osservare? _____

A2. Se si allontana lo schermo con cui si intercettano i fasci, che cosa cambierà nelle immagini che si osservano sullo schermo stesso?

A3. Si intercettano i due fasci emergenti dal cristallo con un polaroid.

A3.1 Ci si aspetta che cambi l'intensità dei fasci intercettati sullo schermo, quando si ruota il polaroid mantenendolo sullo stesso piano?

A3.2 Si prevede di trovare delle orientazioni del polaroid, per cui sullo schermo si ha una sola immagine? ☐ Sì ☐ No

Eventualmente quali?

A4. Si ruota di un piccolo angolo ($<30^\circ$) il cristallo, intorno alla direzione di incidenza della luce.

A4.1 Che cosa ci si aspetta che accada alle immagini intercettate sullo schermo?

A4.2 Che cosa ci si aspetta che accada analizzando la polarizzazione dei fasci con un polaroid?

A5. In base quali ipotesi hai formulato le tue previsioni? _____

B. Esperimento

Effettuare ora l'esperimento

B1. Quanti fasci si osservano? _____

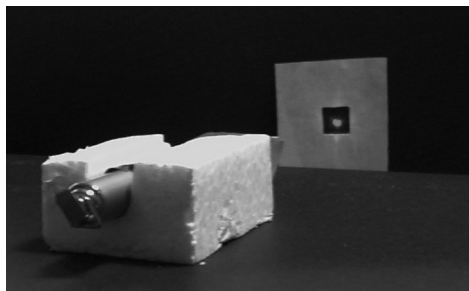
B2. Se allontani lo schermo con cui si intercettano i fasci, che cosa cambia nelle immagini che si osservano sullo schermo stesso?

Scheda 13 - BR1.6 - La propagazione di un solo fascio in un cristallo birifrangente

Il fascio di luce polarizzata di un puntatore laser incide su un cristallo birifrangente (calcite tipo spato d'Islanda).

Si intercettano su uno schermo i fasci che emergono dal cristallo.

Si ruota il puntatore laser intorno al suo asse.



A Previsioni

A1. Cambierà il numero di fasci che emergeranno dal cristallo quando si ruota il puntatore?

☐ Sì ☐ No

A2. Cambierà la loro polarizzazione? ☐ Sì ☐ No

A3. Cambierà la loro intensità? ☐ Sì ☐ No

A4.1 Ci saranno dei casi in cui dal cristallo emergerà un solo fascio?

☐ Sì

A4.2 illustrare la situazione in cui prevedi di trovare questo risultato _____

A4.3 Specificare nell'illustrazione la polarizzazione del fascio incidente, quella del solo fascio trasmesso.

☐ No

A4.4 Spiegare la risposta _____

A5. In base quali ipotesi hai formulato le tue previsioni? _____

B. Esperimento

Si effettua ora l'esperimento.

Si ruota il puntatore laser intorno al suo asse e si osservano i fasci intercettati dallo schermo che emergono dal cristallo.

B1. Cambia il numero di fasci, che emergono dal cristallo quando si ruota il puntatore?

☐ Sì ☐ No

Spiegare _____

Scheda 14 - BR1.7 - Domande per casa sull'interazione di luce con un cristallo birifrangente

Rispondere alle seguenti domande in base agli esiti dell'esperimento precedente sui cristalli birifrangenti svolto in aula:

1. Un fascio di luce polarizzata linearmente incide su una faccia di un cristallo birifrangente orientato in modo che il fascio ordinario sia polarizzato verticalmente.

Quanti fasci si osservano in genere? _____

Che intensità hanno questi fasci? _____

Qual è la loro polarizzazione? _____

2. Se il fascio ordinario è polarizzato verticalmente, come è polarizzato quello straordinario?

3. La polarizzazione del fascio ordinario e quella del fascio straordinario dipendono dalla polarizzazione del fascio incidente? ☐ Sì ☐ No

Spiegare:

4. L'intensità del fascio ordinario e quella del fascio straordinario dipendono dalla polarizzazione del fascio incidente? ☐ Sì ☐ No

Spiegare:

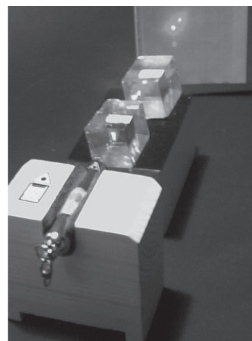
5. Un fascio di luce polarizzata linearmente a 45° incide su una faccia di un cristallo birifrangente, orientato in modo che il fascio ordinario sia polarizzato verticalmente.
Il rapporto tra l'intensità del fascio ordinario e quella del fascio straordinario è uguale a:

☐ 0 ☐ 1/4 ☐ 1/2 ☐ 1 ☐ 2

Motivare la risposta

Scheda 15 - BR2.1 - L'interazione di luce con due cristalli paralleli

Due cristalli di calcite sono disposti uno di seguito all'altro con le facce corrispondenti parallele (cristalli diretti). Il fascio di luce polarizzata di un puntatore laser incide sul primo cristallo. Si dispone il puntatore in modo da ottenere due fasci trasmessi di uguale intensità. I fasci trasmessi incidono sul secondo cristallo. Con uno schermo S si intercettano i fasci emergenti dal secondo cristallo.

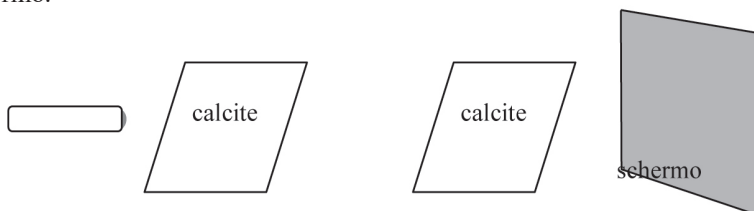


A Previsioni

A1. Quanti fasci di luce ci si aspetta che emergano dal secondo cristallo?

A2. Che polarizzazione si prevede che abbiano? _____

A3. Illustrare che cosa ci si aspetta di osservare, tracciando il cammino dei diversi fasci di luce: quello che incide sul primo cristallo, quelli che vengono trasmessi da ciascuno dei due cristalli e intercettati dallo schermo.



A4. Rappresentare nel disegno la polarizzazione che ci si aspetta di rilevare per i diversi fasci.

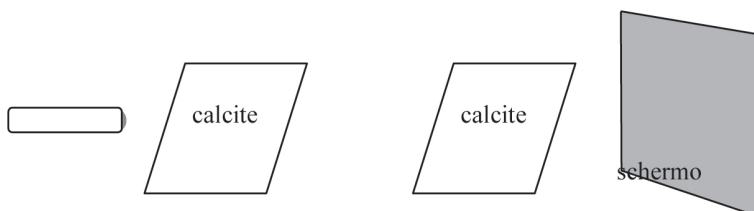
A5. In base quali ipotesi sono state formulate le previsioni? _____

B. Esperimento

Si effettua ora l'esperimento.

B1. Quanti fasci di luce emergono dal secondo cristallo? _____

B2. Illustrare la situazione osservata, tracciando il cammino dei diversi fasci di luce: quello incidente; quelli trasmessi da ciascun cristallo.



B3.1 Esplorare con un polaroid analizzatore la polarizzazione dei diversi fasci e rappresentarla nella figura.

B3.2 Riportare il risultato della esplorazione sulla polarizzazione nella seguente tabella

Luce che incide sul primo cristallo	Fasci che si propagano tra i due cristalli		Fasci che emergono dal secondo cristallo e incidono sullo schermo	

C. Confronto

C1. Confrontare le previsioni con le osservazioni effettuate. Discutere analogie e differenze.

Analogie	Differenze

C2. In base alle osservazioni fatte.

C2.1 Sono ancora valide le ipotesi alla base delle previsioni? ☐ Sì ☐ No

C2.2 Eventuali modifiche? _____

D. Conclusioni

D1. In merito al numero di fasci emergenti dal secondo cristallo.

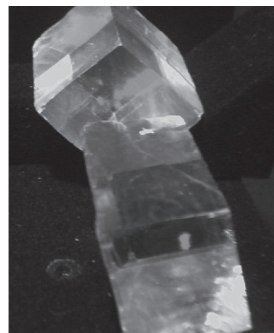
Si osservano _____ fasci, che emergono dal secondo cristallo, perché _____

D2. Che cosa si può concludere in merito alla polarizzazione dei fasci emergenti dal secondo cristallo? _____

D3. Riepilogare in forma di conclusioni le osservazioni effettuate.

Scheda 16 - BR2.2 - L'interazione di luce con due cristalli a 45°

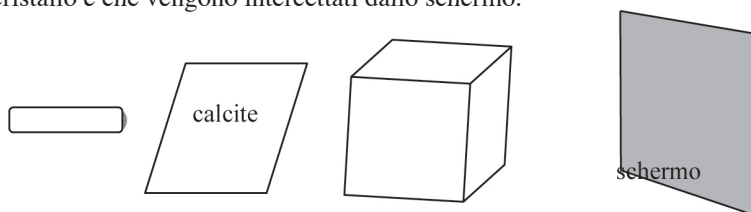
Due cristalli di calcite sono allineati, uno di seguito all'altro, con il raggio di un puntatore laser, inizialmente con le facce corrispondenti parallele (cristalli diretti). Il secondo cristallo viene ruotato di 45° intorno alla direzione di propagazione del fascio incidente sul primo cristallo. Con uno schermo si intercettano i fasci emergenti dal secondo cristallo.

**A. Previsioni**

A1. Quanti fasci di luce ci si aspetta di osservare in uscita dal secondo cristallo? _____

A2. Che polarizzazione ci si aspetta che abbiano? _____

A3. Illustrare la situazione che ci si aspetta di osservare, tracciando il cammino dei diversi fasci di luce: quello che incide sul primo cristallo; quelli che si propagano tra i due cristalli, quelli emergenti dal secondo cristallo e che vengono intercettati dallo schermo.



A4. Rappresentare nel disegno la polarizzazione che ci si aspetti di rilevare per i diversi fasci raffigurati.

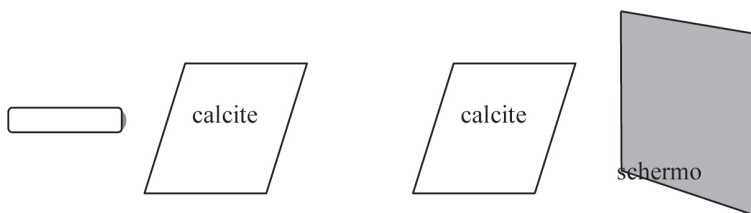
A5. Su quali ipotesi sono basate le previsioni? _____

B. Esperimento

Si effettua ora l'esperimento.

B1. Quanti fasci di luce si osservano emergere dal secondo cristallo? _____

B2. Illustrare la situazione osservata. Tracciare il cammino dei diversi fasci di luce, quello che incide sul primo cristallo e quelli trasmessi da ciascuno dei due cristalli.



B3.1 Esplorare con un polaroid analizzatore la polarizzazione dei diversi fasci. Rappresentare nella figura la polarizzazione rilevata dei diversi fasci di luce.

B3.2 Riportare il risultato della esplorazione sulla polarizzazione nella seguente tabella

Luce che incide sul primo cristallo	Fasci che si propagano tra i due cristalli		Fasci che emergono dal secondo cristallo e incidono sullo schermo	

C. Confronto

C1. Confronta le tue previsioni con le osservazioni fatte. Discuti analogie e differenze.

Analogie	Differenze

C2. In base alle osservazioni fatte, ritieni ancora valide le ipotesi che ti hanno condotto alle previsioni formulate? ☐ Sì ☐ No

Eventualmente come le modifichereesti? _____

D. Conclusioni

D1. In merito al numero di fasci emergenti dal secondo cristallo.

Si osservano _____ fasci, che emergono dal secondo cristallo, perché _____

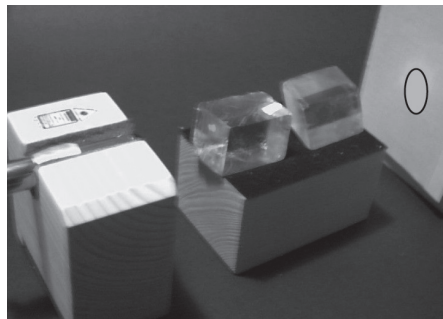
D1.2. Quali conclusioni di possono trarre in merito alla polarizzazione dei fasci emergenti dal secondo cristallo?

D2. Riepilogare in forma di conclusioni le osservazioni effettuate.

Scheda 17 - BR2.3 - L'interazione di luce con due cristalli inversi

Su due cristalli di calcite allineati, uno diretto e uno inverso (*), incide il fascio di luce polarizzata di un puntatore laser. Con uno schermo S si intercetta la luce emergente dal secondo cristallo (nella foto un ovale copre la parte illuminata).

(*) Un cristallo inverso è l'immagine speculare di un cristallo diretto. Per ottenere la disposizione descritta si parte con i due cristalli diretti (ossia con le facce corrispondenti parallele) e si ruota il secondo cristallo 180° intorno alla direzione di propagazione della luce.

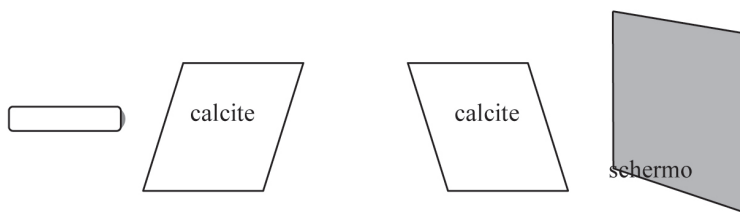


A Previsioni

A1. Quanti fasci di luce ci si aspetta di osservare in uscita dal secondo cristallo? _____

A2. Con che polarizzazione? _____

A3. Illustrare la situazione che ci si aspetta di osservare. Tracciare il cammino dei diversi fasci di luce: quello incidente sul primo cristallo e quelli trasmessi da ciascuno dei cristalli.



A4. Rappresentare nel disegno la polarizzazione, che si prevede di rilevare per i diversi fasci raffigurati.

A5. In base quali ipotesi sono state formulate le previsioni? _____

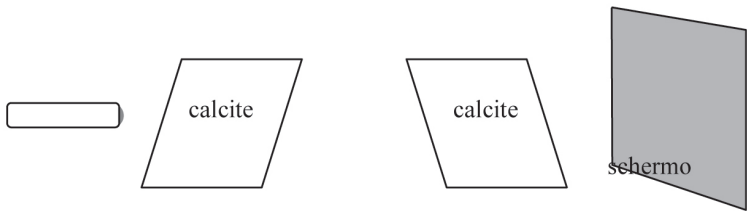
B. Esperimento

Si effettua ora l'esperimento.

B1. Quanti fasci di luce si osservano emergere dal secondo cristallo? _____

B2. Illustrare la situazione osservata. Tracciare il cammino dei diversi fasci di luce.

B3.1 Esplorare con un polaroid analizzatore la polarizzazione dei diversi fasci e rappresentarla per ciascuno dei fasci raffigurati.



B3.2 Riportare il risultato della esplorazione sulla polarizzazione nella seguente tabella

Luce che incide sul primo cristallo	Fasci che si propagano tra i due cristalli		Fasci che emergono dal secondo cristallo e incidono sullo schermo	

C. Confronto

C1. Confrontare le previsioni con le osservazioni fatte. Discutere analogie e differenze.

Analogie	Differenze

C2. In base alle osservazioni effettuate, sono ancora valide le ipotesi alla base delle previsioni formulate? ☐ Sì ☐ No

Eventuali modifiche? _____

D. Conclusioni

D1.1 In merito al numero di fasci emergenti dal secondo cristallo.
Si osservano _____ fasci, che emergono dal secondo cristallo, perché _____

D1.2 Quali conclusioni si possono fare in merito alla polarizzazione della luce emergente dal secondo cristallo?

D2. Riepilogare in forma di conclusioni le osservazioni effettuate.

Scheda 18 - PolRifle1: La polarizzazione per riflessione della luce

Una lamina rifrangente (una lastra di vetro o plexiglas, un lucido per proiezioni) è appoggiata vericalmente su un supporto. Su di essa incide il fascio di luce di una torcetta penlight. Con un polaroid si analizza la luce riflessa per vari angoli di incidenza.



A. Previsioni

A1. Che cosa si prevede di osservare nei diversi casi proposti? Indicarlo nella seconda colonna della tabella.

situazione	Variazione nella intensità della luce che si prevede di osservare attraverso l'analizzatore, quando viene ruotato.	Previsione sulla polarizzazione della luce
A1.1 Incidenza normale		
A1.2 Incidenza a ~ 30°		
A1.3 Incidenza a ~ 60°		
A1.4 Incidenza a ~ 80°		

A2. In quali casi si prevede che la luce riflessa sia polarizzata? Indicarlo nella terza colonna della tabella.

A3. Previsioni su altri casi che ritengono interessanti da esplorare _____

B. Osservazione sperimentale

Si effettui ora l'esperimento utilizzando un foglio di acetato per lucidi.

B1. Che cosa si osserva nei diversi casi proposti? Riportare le osservazioni nella seconda colonna della tabella sottostante.

situazione	Variazione della intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, ruotato intorno alla direzione di osservazione	Conclusione in merito alla polarizzazione della luce riflessa
B1.1 Incidenza normale		
B1.2 Incidenza a ~ 30°		
B1.3 Incidenza a ~ 60°		
B1.4 Incidenza a ~ 80°		

B2. Quale conclusione si può trarre sulla polarizzazione della luce riflessa nei diversi casi? Riportare le conclusioni nella seconda colonna.

C. Confronto

Confrontare il risultato ottenuto sperimentalmente con le previsioni fatte.

C1. Discutere le analogie	C2. Discutere le differenze

D. Analisi

D1. Per ciascun angolo di incidenza della luce, riepilogare nella tabella sottostante le osservazioni effettuate degli aspetti indicati.

situazione	Variazione della intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, ruotato	Orientazione del polaroid rispetto alla verticale per avere un massimo
D1.1 Incidenza normale		
D1.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$		
D1.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$		
D1.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$		

D2. Per i diversi angoli di incidenza, si osserva sempre la stessa differenza tra l'intensità massima e l'intensità minima della luce trasmessa? ☐ Sì ☐ No

Spiegare _____

D3. Per ottenere il massimo di trasmissione, come si deve orientare il polaroid nei diversi casi?

D4. La direzione di incidenza della luce sulla lamina rifrangente influenza:

D4.1 la polarizzazione della luce riflessa? ☐ Sì ☐ No

Spiegare _____

D4.2 la polarizzazione della luce riflessa? ☐ Sì ☐ No

Spiegare _____

D5.1 Da che cosa dipende la differenza tra l'intensità massima e minima della luce trasmessa?

D5.2 Da che cosa dipende la polarizzazione osservata della luce riflessa?

E. Esplorazione della riflessione da altri mezzi rifrangenti.

Si esplorano altre situazioni per generalizzare i risultati.

E1. Si operi ad esempio con una lastra di vetro o _____ (specificare)
Si riportino i risultati delle osservazioni nella seguente tabella

situazione	Variazione della intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, ruotato	Conclusione in merito alla polarizzazione della luce
E1.1 Incidenza normale		
E1.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$		
E1.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$		
E1.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$		

E2. Confronto con il primo caso

Si confrontino i risultati ottenuti in questo secondo caso con quelli ottenuti nel primo (tabella B)

E2.1 Analogie	E2.2 Differenze

F. Esplorazione della riflessione da uno specchio

F1. Si operi ora con un normale specchio riflettente (uno specchio da toelette)

Si riportino i risultati delle osservazioni

situazione	Osservazione della intensità della luce attraverso l'analizzatore, ruotato intorno alla direzione di osservazione	Conclusione in merito alla polarizzazione della luce
F1.1 Incidenza normale		
F1.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$		
F1.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$		
F1.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$		

F2. Confronto con il primo caso

Si confrontino i risultati ottenuti in questo terzo caso con quelli ottenuti nel primo caso (tabella B)
Si discutano analogie e differenze.

F2.1 Analogie	F2.2 Differenze

G. Conclusioni

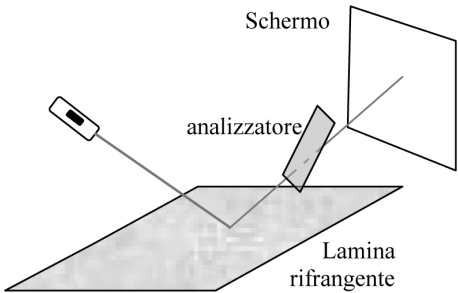
G1. Quali sono le condizioni per cui si osserva luce polarizzata per riflessione?

G2. Descrivere e illustrare in che modo la direzione di incidenza della luce determina la polarizzazione della luce riflessa.

G3. In quali condizioni la luce riflessa risulta maggiormente polarizzata?
G4. Riassumere i risultati ottenuti in forma di conclusioni.

Scheda 19 - PolRifle2 - Riflessione di luce polarizzata

Attività 1. Il fascio di un puntatore laser incide su una lamina rifrangente (lastra di vetro). Si intercetta il fascio riflesso con un piccolo schermo (**Attenzione! non osservare direttamente la luce riflessa**). Si considerano angoli di incidenza diversi, facendo in modo che la polarizzazione della luce incidente abbia sempre la stessa orientazione rispetto alla lamina (si inclina diversamente il puntatore laser senza ruotarlo intorno al suo asse).



A. Previsioni

A1. Si varia l’angolo di incidenza. Quali previsioni si possono fare sulla luce riflessa in merito a: intensità, orientazione della polarizzazione; grado di polarizzazione (direttamente proporzionale alla differenza tra intensità massima e minima trasmessa dal polaroid analizzatore)?

A1.1 Intensità della luce riflessa: _____

A1.2 Polarizzazione della luce riflessa: _____

A1.3 Grado di polarizzazione della luce riflessa _____

A2. Si confrontino: il caso proposto nella presente scheda, in cui la luce incidente sulla lamina di vetro è quella di un laser (quindi polarizzata); il caso studiato nella scheda PolRifle1, in cui la luce incidente era non polarizzata. Quali differenze si prevedono? _____

A3. Sulla base di quali ipotesi sono state formulate le previsioni? _____

B. Osservazione sperimentale

Si effettui ora l’esperimento.

B1. Variare inizialmente solo l’angolo di incidenza. Che cosa si osserva nei diversi casi proposti?

situazione	Variazione della intensità della luce trasmessa dall’analizzatore, ruotato	Conclusione in merito alla polarizzazione della luce riflessa
B1.1 Incidenza normale		
B1.2 Incidenza a ~ 30°		
B1.3 Incidenza a ~ 60°		
B1.4 Incidenza a ~ 80°		

C. Confronti

Confrontare il risultato ottenuto sperimentalmente con le previsioni effettuate nei punti A1.1-2-3.

C1.1 Discutere le analogie tra i due casi	C1.2 Discutere le differenze tra i due casi
--	--

C2. Si confrontino: il caso proposto nella presente scheda, in cui si usa luce laser polarizzata e quello studiato nella scheda PolRifle1, in cui la luce incidente era non polarizzata.

C2.1 Discutere le analogie tra i due casi	C2.2 Discutere le differenze tra i due casi
--	--

C3. Si confrontino le previsioni effettuate nel punto A2, con l'esito sperimentale.

C3.1 Discutere le analogie	C3.2 Discutere le differenze
-----------------------------------	-------------------------------------

D. Conclusioni sull'attività 1.

D1. Quali conclusioni puoi trarre da questa prima attività, in merito a come si riflette la luce polarizzata su una lamina rifrangente?

Attività 2.

Per ciascuno degli angoli di incidenza indicati, si esplorino le tre situazioni in cui si ruota il puntatore laser intorno al suo asse.

A. Previsioni

A1. Per ciascun angolo di incidenza indicato, si prevedano le intensità dei fasci di luce riflessa nei tre casi specificati (polarizzazione della luce incidente: perpendicolare alla lamina rifrangente; a 45° rispetto alla lamina; parallela alla lamina).

Per ciascun angolo di incidenza, si confrontino le intensità relative ai tre casi e si barri l'opzione scelta tra le seguenti: A – intensità massima, B- minima, C – media; D sempre la stessa)

polarizzazione Angolo di incidenza	\perp alla lamina	a 45° rispetto alla lamina	// al piano di incidenza
A2.1 Incidenza normale	A B C D	A B C D	A B C D
A2.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$	A B C D	A B C D	A B C D
A2.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$	A B C D	A B C D	A B C D
A2.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$	A B C D	A B C D	A B C D

A2. Sulla base di quali ragionamenti sono state formulate le previsioni?

B. Esperimento

Si effettua ora l'esperimento. Per ciascuno degli angoli di incidenza indicati si realizzino le tre situazioni indicate, ruotando il puntatore laser intorno al suo asse.

B1. Per ciascun angolo di incidenza indicato:

- si considerino i tre casi (polarizzazione della luce incidente: perpendicolare alla lamina rifrangente; a 45° rispetto alla lamina; parallela alla lamina);
- si confrontino le intensità dei fasci di luce riflessa e si barri l'opzione scelta tra le seguenti: A – intensità massima, B – minima, C – media; D sempre la stessa

polarizzazione Angolo di incidenza	\perp alla lamina	a 45° rispetto alla lamina	// al piano di incidenza
A2.1 Incidenza normale			
A2.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$			
A2.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$			
A2.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$			

B2.1 Sono stati osservati dei casi in cui la luce viene totalmente/prevalentemente riflessa?

☐ Sì ☐ No

B2.2 Eventualmente quali? _____

B3.1 Sono stati osservati dei casi in cui la luce non viene riflessa (o viene prevalentemente trasmessa nella lamina)? _____

☐ Sì ☐ No

B3.2 Eventualmente quali? _____

C. Confronto

Si confronti il risultato ottenuto sperimentalmente con le previsioni formulate.

C1.1 Discutere le analogie	C1.2 Discutere le differenze

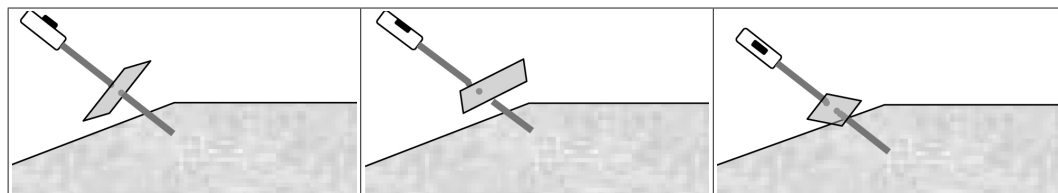
C2. Confrontare quanto osservato nel presente caso, con quanto è stato rilevato nel caso della riflessione di luce non polarizzata. Discutere le differenze.

D. Analisi

Si consideri il caso in cui l'angolo di incidenza è prossimo a 60° .

D1. Disegnare in ciascuna delle tre figure sottostanti:

- il fascio di luce riflesso, con uno spessore diverso a seconda della diversa intensità rilevata;
- il i vettori che descrivono la polarizzazione della luce nel tre situazioni del fascio incidente e del fascio riflesso.



E. Conclusioni sull'attività 2.

E1. Quali conclusioni puoi trarre da questa seconda attività sulla riflessione della luce polarizzata?

E2.1 L'intensità della luce riflessa dipende dalla polarizzazione della luce incidente? Spiega

E2.2 Eventualmente in che modo? _____

E2.3 Come lo si fa a capire? _____

E3.1 La polarizzazione della luce riflessa dipende dalla polarizzazione della luce incidente?

E3.2 Eventualmente in che modo? _____

E3.3 Come lo si fa a capire? _____

E4. La disposizione nello spazio della superficie riflettente, del piano di incidenza della luce, determino il modo con cui la luce polarizzata si riflette?

☐ Sì ☐ No

spiega? _____

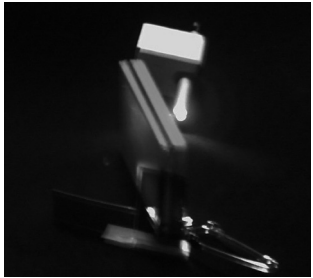
F. Conclusioni sulle due attività condotte nella presente scheda

F1. Quali sono le condizioni per cui la luce polarizzata viene prevalentemente riflessa da una lamina rifrangente?
F2. In che modo la disposizione nello spazio della superficie riflettente, del piano di incidenza della luce, determino il modo con cui la luce polarizzata si riflette?
F3. In quali condizioni la luce incidente viene quasi completamente/prevalentemente riflessa?
F4. In quali condizioni la luce incidente non viene riflessa o viene riflessa solo in piccola percentuale?
F5. Riassumere i risultati ottenuti in forma di conclusioni.

Scheda 20 - PolRifra - La polarizzazione per rifrazione della luce

Attività 1. La luce trasmessa da una lamina rifrangente.

Con un polaroid (analizzatore) si analizza la luce trasmessa da una lastra di materiale rifrangente (ad esempio una lastra di vetro) per vari angoli di incidenza.



A. Previsioni

A1. Che cosa si prevede di osservare nei diversi casi proposti?

Situazione	Previsione sulla variazione dell'intensità della luce osservata attraverso l'analizzatore, ruotato	Previsione sulla polarizzazione della luce
A1.1 Incidenza normale		
A1.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$		
A1.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$		
A1.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$		

A1.5 Previsioni su altri casi che ritieni interessanti esplorare _____

B. Osservazione sperimentale

Si effettui ora l'esperimento.

B1. Che cosa si osserva nei diversi casi proposti?

Situazione	Osservazione della variazione di intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, ruotato	Conclusione in merito alla polarizzazione della luce
B1.1 Incidenza normale		
B1.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$		
B1.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$		
B1.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$		

C. Confronto

Si confronti il risultato ottenuto sperimentalmente con le previsioni formulate.

C1. Discutere analogie e differenze

C2. Come si possono spiegare i risultati ottenuti?**Attività 2. Trasmissione da più lamine rifrangenti**

Si ripete l'esplorazione effettuata nell'attività 1, analizzando con un polaroid la luce trasmessa da più lamine rifrangenti sovrapposte.

A. Previsioni

A1. Che cosa si prevede di osservare nei diversi casi proposti?

Situazione	Previsione sulla variazione dell'intensità della luce osservata attraverso l'analizzatore, ruotato	Previsione sulla polarizzazione della luce
A1.1 Incidenza normale		
A1.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$		
A1.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$		
A1.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$		

B. Osservazione sperimentale

Si effettui ora l'esperimento.

B1. Che cosa si osserva nei diversi casi proposti?

situazione	Osservazione della variazione di intensità della luce trasmessa dall'analizzatore, ruotato	Conclusione in merito alla polarizzazione della luce
B1.1 Incidenza normale		
B1.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$		
B1.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$		
B1.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$		

C. Confronto

Confronta il risultato ottenuto sperimentalmente con le previsioni fatte.

C1. Discutere analogie e differenze

C2. Confrontare il risultato ottenuto nell'attività 2 con quello ottenuto nell'attività 1.

C2.1 Quali differenze si rilevano? _____

C2.2 Come si possono spiegare i risultati ottenuti? _____

D. Analisi

D1. Per ciascun angolo di incidenza della luce, riepiloga nella tabella le osservazioni relative ai seguenti aspetti indicati.

situazione	Differenza tra intensità massima e intensità minima della luce trasmessa dall'analizzatore	Orientazione del polaroid rispetto alla verticale per ottenere un massimo di trasmissione
D1.1 Incidenza normale		
D1.2 Incidenza a $\sim 30^\circ$		
D1.3 Incidenza a $\sim 60^\circ$		
D1.4 Incidenza a $\sim 80^\circ$		

D2. Per i diversi angoli di incidenza, si osserva attraverso l'analizzatore sempre la stessa variazione dell'intensità della luce trasmessa? ☐ Sì ☐ No

Spiega _____

D3. Per ottenere il massimo di trasmissione, come si deve orientare il polaroid nei diversi casi?

D4.1 La disposizione nello spazio del foglio rifrangente, del raggio di luce incidente, per un fissato angolo di incidenza, influenzi la polarizzazione della luce trasmessa attraverso le lamine rifrangenti?

☐ Sì ☐ No

D4.2 In che modo?

E. Condizione di Brewster

Si dispongono le lamine rifrangenti su un foglio di carta millimetrata appoggiato su una tavoletta di polistirolo. Si orienta l'insieme delle lamine rifrangenti (parallele fra loro) in modo da ottenere il massimo grado di polarizzazione della luce trasmessa (in altre parole la maggiore differenza tra Intensità massima e intensità minima trasmessa dal polaroid analizzatore).

Con degli spilli si ricostruisca il cammino della luce incidente, e della luce trasmessa dalle lamine.

E1.1. Si misuri l'angolo di incidenza α_M per cui si ha questa situazione: $\alpha_M =$ _____

E2. Si ripeta l'osservazione in modo da individuare l'angolo di incidenza per cui si ha il massimo grado di polarizzazione della luce riflessa.

Misurare l'angolo α' per cui si ha questa situazione: $\alpha' =$ _____

E3. Confrontare gli angoli α_M e α' , tenendo conto delle indeterminazioni sulle misure. Che cosa si può dire in merito alla differenza $|\alpha - \alpha'|$?

A) $|\alpha - \alpha'| > 10^\circ$ B) $|\alpha - \alpha'| < 10^\circ$ (ma sicuramente $\alpha \neq \alpha'$) C) $|\alpha - \alpha'| = 0$

D) altro _____

E4. Per un angolo di incidenza pari ad α' , si misuri l'angolo formato dalla direzione del raggio riflesso e quella del raggio rifratto (la direzione con cui la luce viene rifratta all'interno delle lamine).

Se ne riporti il valore _____

E5.1 Illustrare con un disegno la situazione per cui si ha il massimo grado di polarizzazione della luce rifratta.	
E5.2 Tracciare opportunamente sul disegno i vettori che rappresentano le polarizzazioni della luce riflessa e della luce trasmessa.	

F. Conclusioni

F1. Quali sono le condizioni per cui si osserva luce polarizzata per rifrazione?
F2. In che modo la disposizione nello spazio dei fogli rifrangenti, del raggio di luce incidente, per un fissato angolo di incidenza, influenzano la polarizzazione della luce trasmessa?
F3. In quali condizioni si ottiene il massimo grado di polarizzazione della luce rifratta?
F4. Come si può spiegare questo fatto?
F5. Riassumere i risultati ottenuti in forma di conclusioni.

Scheda 21 - PolTras1 – Trasmissività di filtri rifrangenti

Filtri rifrangenti. Si dispongono: un sensore e una torcetta tipo penlight ad una fissata distanza in modo che la parte sensibile del sensore sia ben illuminata dal fascio di luce prodotto dal proiettore e si acquisisce l'intensità luminosa così misurata dal sensore. Si interpongono tra il proiettore e il sensore 1, 2, 3... lamine rifrangenti (vetro o plexiglas) e ogni volta si acquisisce l'intensità luminosa misurata dal sensore.



A. Attività preliminari.

A1. Calibrazione del sensore

Si dispongono il sensore e il la torcetta a circa 50 cm tra loro. Si calibra il sensore con: valore massimo pari a quello dell'insensità trasmessa; valore minimo quello che si acquisisce oscurandolo con un dito. Effettuata la calibrazione si riduce leggermente l'intensità della luce generata dalla sorgente, ovvero la si allontana leggermente dal sensore. In ogni caso l'intensità luminosa trasmessa deve essere sufficientemente elevata rispetto al rumore e inferiore al limite di saturazione del sensore.

A2. Stima dell'indeterminazione sulla misura

Si acquisisca per qualche decina di secondi l'intensità di luce, quando si ha un massimo di trasmissione. Si stimino il valore medio I dell'intensità rilevata (in u.a.), la sua indeterminazione assoluta ΔI (in u.a.) e relativa $I / \Delta I$ (in %) e se ne riportano qui i valori:

$I =$ _____

$\Delta I =$ _____


$I / \Delta I =$ _____

A3. Stima della intensità di fondo

Intensità del fondo di luce che incide sul sensore quando il laser è spento.	$I_{\text{fondo}} =$ _____
--	----------------------------

B. Previsioni

B1. Che andamento si prevede di rilevare per l'intensità della luce trasmessa, all'aumentare del numero N di filtri? Motivare la risposta.

<p>B1.1 Grafico previsto</p> 	<p>B1.2 Motivazione</p>
---	--------------------------------

C. Acquisizione – Rappresentazione dei dati

Si acquisisca ora l'intensità I_0 della luce che incide direttamente sul sensore e quella I che incide su esso trasmessa da 1, 2, 3...filtri rifrangenti

C1.1 Si riportino nella tab. 1 le misure per I , eventualmente corrette del fondo, e si costruisca la colonna delle intensità relative I/I_0 ,

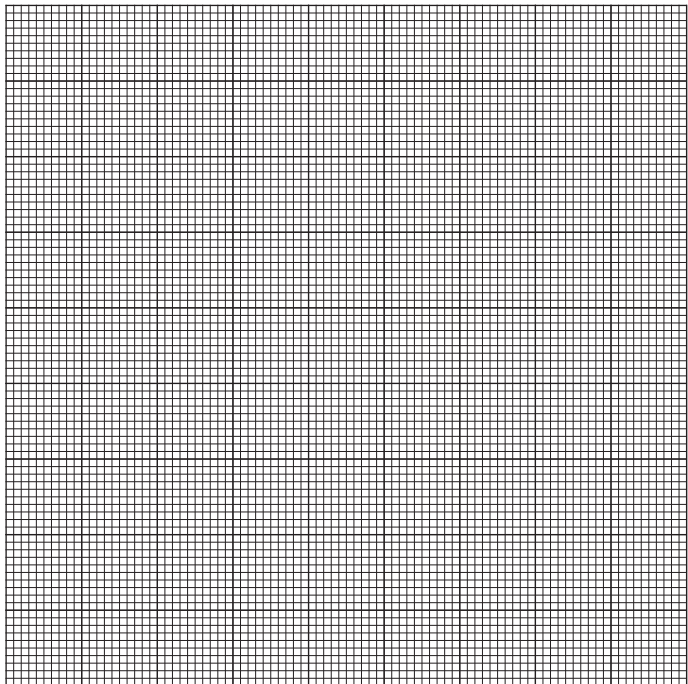
Tabella 1		
N (N° filtri)	I (u.a.)	I/I_0
0	$I_0 =$	1
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

C1.2 In alternativa si possono riportare i dati su un foglio elettronico. Ad esempio in figura è riportata la parte di interesse del file: elaborazione_dati_esperimenti.xls. I valori misurati dell'intensità luminosa vengono riportati nella colonna F. Dopo aver inserito nella cella B5 (in giallo in figura) il valore massimo rilevato, nella colonna G vengono calcolati i valori delle intensità relativi a tale valore massimo.

Microsoft Excel - Elaborazione_dati_esperimenti									
File Edit View Insert Format Tools Data Window Help									
I23									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4									
5	I _{max} =	1			N	I (u.a.)	I/I _{max}		N
6							=F7/\$B\$5		=ln(G7)
7					1	1	1		1
8	β (°) =	1			2				2
9					3				3
10					4				4
11					5				5
12					6				6
13					7				7
14					8				8

Selezione del foglio elettronico con cui si può effettuare
L'elaborazione dati. A questa immagine si farà riferimento anche nel seguito.

C2.1 Si costruisca sulla carta millimetrata a destra il grafico di:
 I/I_0 in funzione di N .



C2.2 In alternativa si può usare il foglio elettronico. Con riferimento alla figura riportata in precedenza, dopo aver selezionato le colonne E ed F, si attiva la funzione per tracciare il grafico di dispersione di I/I_{max} in funzione di N (allegare una stampa del grafico ottenuto alla scheda).

C3. In base ai dati ottenuti, che tipo di curva può rappresentarli meglio? (lineare, quadratica, esponenziale...) Motivare la risposta

D. Confronto

D1. Confrontare l'andamento ottenuto con quello previsto, evidenziando analogie e differenze.

D1.1 Analogie	D1.2 Differenze
----------------------	------------------------

D2. Motivare le eventuali differenze

E. Elaborazione. Analisi dei rapporti delle intensità misurate e valutazione del coefficiente di trasmissione

E1. Si valutino i rapporti I_{n+1}/I_n della intensità trasmessa dall'n+1-esimo filtro e quella trasmessa nell'n-esimo filtro. Si riportino i risultati nella terza colonna della tabella 2.

Tabella 2		
N	I_n/I_0	$(I_{n+1}/I_0)/(I_n/I_0)$

E2. Si considerino i risultati ottenuti nella terza colonna. Che conclusione si può trarre?

E3. Il rapporto tra intensità della luce trasmessa e intensità incidente su una lastra rifrangente prende il nome di coefficiente di trasmissione. Quanto vale il coefficiente di trasmissione per le lamine utilizzate? _____

E4. Tale coefficiente si può considerare caratteristico delle lamine utilizzate? _____

E5. Come si può valutare l'intensità della luce trasmessa dall'n-esimo filtro noti che siano I_0 , l'intensità della luce incidente, e T , il coefficiente di trasmissione dei filtri? _____

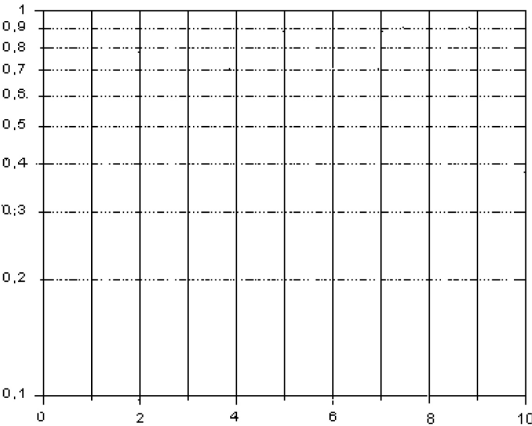
F. Elaborazione. Analisi della relazione tra intensità della luce trasmessa e numero dei filtri.
Si propongono in alternativa l'elaborazione con carta e penna su scala semilogaritmica (F1) e l'elaborazione su foglio elettronico (F2).

F1. Elaborazione con carta e penna

Elaborazione su scala semilogaritmica

F1.6 Si riportino i dati sul diagramma semilogaritmico riprodotto a lato.

F1.7 Che tipo di curva li rappresenta meglio?



F1.8 Si tracci la retta che interpola i dati.

F1.9 Se ne individui l'equazione, attraverso la lettura del grafico, e la si riporti nello spazio accanto

F1.10 Si tenga conto del fatto che nella scala semilogaritmica le suddivisioni orizzontali sono equispaziate (scala lineare), mentre non sono equispaziate quelle verticali (scala logaritmica). Una relazione lineare nel grafico semilogaritmico, ossia tra le variabili $X' = X$ e $Y' = \text{Log}(Y)$:

$$Y' = q + mX'$$

che ha pendenza m e intercetta dell'asse verticale q , corrisponde ad una dipendenza tra le variabili X e Y del tipo

$$Y = B e^{AX},$$

dove i coefficienti A e B sono legati a m e q dalle relazioni: dati da: $m = A$ e $q = \text{Log}(B)$. Nel caso specifico del diagramma qui riportato si hanno in particolare:

$$m = Y'(X'=1) \text{ (ordinata nel grafico semilogaritmico del punto di asse 1)}$$

$$q=1.$$

In base alle considerazioni precedenti determinino m , i coefficienti A e B e la relazione che intercorre tra I/I_0 e N .

$m =$	$q=1$
$A =$	$B =$
Relazione che intercorre tra I/I_0 e N	

F2. Elaborazione con foglio elettronico

F2.1 Si costruisca una apposita colonna per valutare i rapporti I_{n+1}/I_n della intensità trasmessa dall' $n+1$ -esimo filtro e quella trasmessa nell' n -esimo filtro (es. La colonna H).

F2.2 Si considerino i risultati ottenuti nella colonna considerata. Che conclusione si può trarre?

F2.3 il rapporto tra intensità della luce trasmessa e intensità incidente su una lastra rifrangente prende il nome di coefficiente di trasmissione. Quanto vale il coefficiente di trasmissione per le lamine utilizzate? _____

F2.4 Tale coefficiente si può considerare caratteristico delle lamine utilizzate? _____

F2.5 Come si può valutare l'intensità della luce trasmessa dall' n -esimo filtro noti che siano I_0 ,

l'intensità della luce incidente, e T , il coefficiente di trasmissione dei filtri? _____

F2.6 Si costruisca la colonna del il logaritmo naturale delle intensità relative (I/I_0) rilevate (colonna J nella figura di pagina 2). Dopo aver evidenziato le colonne I e J, si attivi l'apposita funzione del foglio elettronico per costruire il grafico di dispersione: $\ln(I/I_0)$ in funzione di N .

F2.7 Che tipo di curva descrive meglio la relazione che intercorre tra $\ln(I/I_0)$ e N ?

F2.8 Si effettui una interpolazione lineare dei dati (fit lineare).

F2.9 Si riporti nello spazio a destra l'equazione ottenuta e il coefficiente di correlazione.

equazione	$R^2 =$
-----------	---------

F2.10 A partire dall'equazione precedente, che lega $\ln(I/I_0)$ e N , si determini la relazione che intercorre tra I/I_0 e N .

--

F2.11 Si stampi una copia del grafico in cui è tracciato il fito e lo si allegghi alla presente scheda.

G. Conclusioni in merito alla trasmittività di filtri rifrangenti.

G1. Si riepilogano i risultati sulla trasmissione di luce attraverso più filtri rifrangenti ottenuti come conclusione.

--

Scheda 22 - PolTras2 - Trasmissività di filtri polaroid

Filtri polaroid.

Si ripetono le misure effettuate precedentemente utilizzando filtri polaroid anziché lamine rifrangenti.

Se necessario si riefettuano le attività preliminari descritte per l'attività A.



A.1 Previsioni

A1. Che andamento si prevede di rilevare per l'intensità della luce trasmessa, all'aumentare del numero N di polaroid? Motivare la risposta.

A1.1 Grafico previsto	B1.2 Motivazione

A2. Che analogie/similitudini e differenze rispetto al caso dei filtro rifrangenti ci si aspetta di osservare?

Analogie/similitudini	Differenze

B. Acquisizione – Rappresentazione dei dati

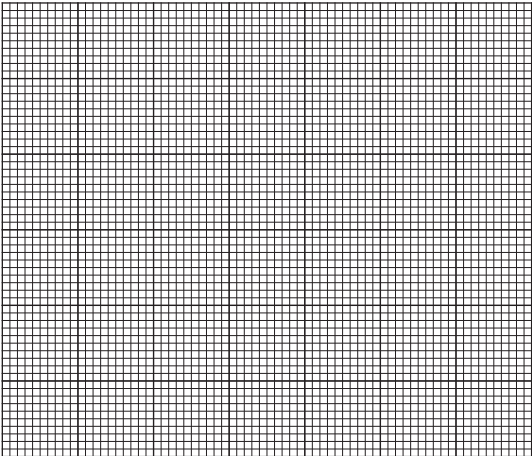
Si acquisisca ora l'intensità I_0 della luce che incide direttamente sul sensore e quella I che incide su esso trasmessa da 1, 2, 3...polaroid.

B1.1 Si riportino nella tab. 3 le misure per I , eventualmente corrette del fondo, e si costruisca la colonna delle intensità relative I/I_0 ,

Tabella 3		
N (N° filtri)	I (u.a.)	I/I_0
0	$I_0 =$	1
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

B1.2 In alternativa si possono riportare i dati su un foglio elettronico. Ad esempio in figura è riportata la parte di interesse del file: `elaborazione_dati_esperimenti.xls`. I valori misurati dell'intensità luminosa vengono riportati nella colonna F. Dopo aver inserito nella cella B5 il valore massimo rilevato, nella colonna G vengono calcolati i valori delle intensità relativi a tale valore massimo.

B2.1 Si costruisca sulla carta millimetrata a destra il grafico di: I/I_0 in funzione di N .



B2.2 In alternativa si può usare il foglio elettronico. Con riferimento alla figura riportata in precedenza, dopo aver selezionato le colonne E ed F, si attiva la funzione per tracciare il grafico di dispersione di I/I_{max} in funzione di N (allegare una stampa del grafico ottenuto alla scheda).

B3. In base ai dati ottenuti, che tipo di curva può rappresentarli meglio? (lineare, quadratica, esponenziale...) Motivare la risposta

C. Confronto

C1. Confrontare l'andamento ottenuto con quello previsto, evidenziando analogie e differenze.

C1.1 Analogie	C1.2 Differenze

C2. Motivare le eventuali differenze

C3. Confronta il risultato ottenuto nel caso dei polaroid con quello osservato con lamine rifrangenti.
C3.1 Quali sono le differenze più significative nei due casi? _____

C3.2 Quali sono le differenze più significative nei due casi? _____

D. Elaborazione. Coefficiente di trasmissione

D1. Si valutino i rapporti I_{n+1}/I_n della intensità trasmessa dall'n+1-esimo filtro e quella trasmessa nell'n-esimo filtro. Si riportino i risultati nella terza colonna della tabella 2.

Tabella 4		
N	I_n/I_0	$(I_{n+1}/I_0)/(I_n/I_0)$

D2. Si considerino i risultati ottenuti nella terza colonna. Che conclusione si può trarre?

D3. Si confronti il valore ottenuto per il rapporto $R_o = \frac{I_1}{I_o}$ e quelli ottenuti per $T_{i+1} = \frac{I_{i+1}}{I_i}$ con $i = 1, 2, 3, \dots$

- Sono uguali? _____
- Come si può spiegare? _____

D4. Quali sono le differenze principali che si rilevano tra il caso della trasmissione di luce tra più polaroid e quella della parte A in cui sono stati utilizzati normali filtri rifrangenti.

D5. Si confrontino fra loro i valori ottenuti per T_i . Si possono considerare uguali fra loro? Spiegare

D6. Si valutino i seguenti rapporti:

$$K_2 = \frac{R_o}{T_2} = \text{_____}; \quad K_3 = \frac{R_o}{T_3} = \text{_____}; \quad K_4 = \frac{R_o}{T_4} = \text{_____}$$

D7. Si confrontino fra loro i valori ottenuti per K . Si possono considerare uguali? Spiegare

D8. Si espliciti quali fenomeni permettono di descrivere i seguenti coefficienti:

T : _____

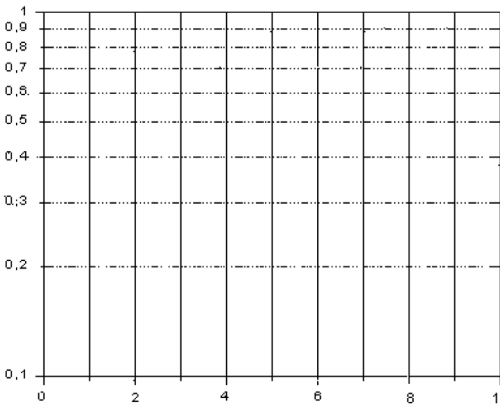
R_0 : _____

K : _____

E. Elaborazione dati- Analisi dell'andamento
Elaborazioni con carta e penna su diagramma semi-logaritmico

E1. Si riportino nel seguente diagramma semi-logaritmico i dati delle prime due colonne della tabella 4 per $n > 0$.

E2. Che tipo di curva li rappresenta meglio?



E3. Si tracci la retta che interpola i dati.

E4. Se ne individui l'equazione, attraverso la lettura del grafico, e la si riporti nello spazio accanto

E5. Sia $Y' = q + mX'$ l'equazione della retta interpolante dei dati di $X' = N$ e $Y' = \text{Log}(I/I_0)$ e sia $I/I_0 = B e^{AN}$, la relazione tra intensità e numero di polaroid.
Si riportino i valori determinati

$m =$	$q =$
$A =$	$B =$
Relazione che intercorre tra I/I_0 e N	

F. Elaborazione con foglio elettronico

F1. Si costruisca la colonna del il logaritmo naturale delle intensità relative (I/I_0) rilevate (colonna J nella figura di pagina 2). Dopo aver evidenziato le colonne I e J, si attivi l'apposita funzione del foglio elettronico per costruire il grafico di dispersione: $\log(I/I_0)$ in funzione di N .

F2. Che tipo di curva descrive meglio la relazione che intercorre tra $\log(I/I_0)$ e N ?

F3. Si effettui una interpolazione lineare dei dati per $n > 0$ (fit lineare).

F4. Si riporti nello spazio a destra l'equazione ottenuta e il coefficiente di correlazione.

Equazione	$R^2 =$
-----------	---------

F5. A partire dall'equazione precedente, che lega $\ln(I/I_0)$ e N , si determini la relazione che intercorre tra I/I_0 e N .

F6. Si stampi una copia del grafico in cui è tracciato il fit e lo si alleggi alla presente scheda.

G. Conclusioni

G1. Si riassumano le esplorazioni effettuate con i polaroid in forma di conclusioni.

G2. Si specifichino le principali differenze tra il caso dei polaroid e quello dei normali filtri rifrangenti.

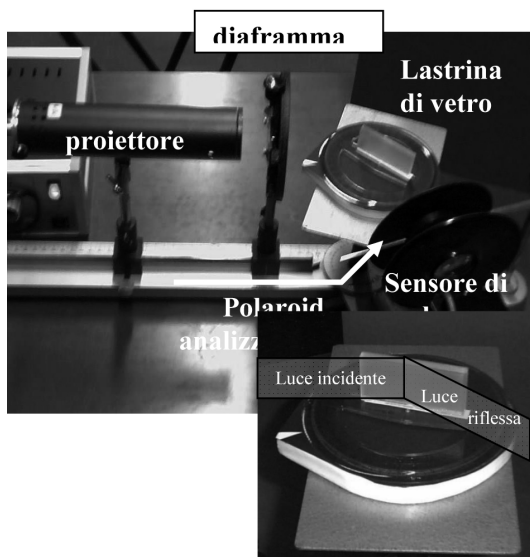
G3. Quanto vale il coefficiente di trasmissione per i polaroid utilizzati? _____

G4. Quali fenomeni consente di descrivere fenomenologicamente?

Scheda 23 - PolBrewster – Misura dell'angolo di Brewster

Procedura. Si scherma un proiettore con un diaframma con una fenditura verticale. Il pennello di luce che emerge dalla fenditura viene fatto incidere su una lastrina di vetro montata su un supporto ruotante dotato di goniometro. Si analizza la luce riflessa dalla lastrina con un polaroid analizzatore. Con un sensore di luce, si misurano le intensità della luce trasmessa.

A partire da una incidenza di $20\text{--}30^\circ$, individuabile leggendo sul goniometro di quanto si deve ruotare il goniometro stesso a partire dalla posizione di incidenza normale, si ruota il supporto con la lastrina di vetro di 10° in 10° , fino ad un angolo di incidenza di $70\text{--}80^\circ$. Per ogni posizione si sposta il sensore in modo da intercettare la luce riflessa. Si misura l'intensità massima I_{\max} e minima I_{\min} della luce trasmessa dall'analizzatore (posizionato quindi per avere un massimo o un minimo di trasmissione per due orientazioni ortogonali fra loro e alla direzione del fascio riflesso).



Si valuta rapporto $R = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{(I_{\max}/I_{\min}) - 1}{(I_{\max}/I_{\min}) + 1}$

A. Attività preliminari.

A1. Calibrazione del sensore

Si posiziona il sistema in modo da avere un angolo di incidenza di circa 60° . Si calibra il sensore con: valore massimo pari a quello dell'intensità massima trasmessa dal polaroid in questa situazione; valore minimo quello che si acquisisce oscurandolo con un dito.

Effettuata la calibrazione si riduce leggermente l'intensità della luce generata dal proiettore, ovvero si allontana leggermente lo stesso rispetto alla posizione in cui è stata fatta la calibrazione. In ogni caso è necessario assicurarsi che l'intensità luminosa riflessa sia nel regime di risposta lineare del sensore di luce utilizzato (intensità luminosa sufficientemente elevata da non confondersi con il rumore e inferiore al limite di saturazione del sensore). Se necessario, si può focalizzare la luce riflessa sul sensore, in modo da avere una intensità sufficientemente elevata.

A2. Stima dell'indeterminazione sulla misura

Si acquisisca per qualche decina di secondi l'intensità di luce, quando si ha un massimo di trasmissione per incidenza di circa 60° . Si stimino il valore medio I dell'intensità rilevata (in u.a.), la sua indeterminazione assoluta ΔI (in u.a.) e relativa $I / \Delta I$ (in %) e se ne riportano qui i valori:

$I =$ _____

$\Delta I =$ _____

$I / \Delta I =$ _____

3. Stima della intensità di fondo

intensità del fondo di luce che incide sul sensore quando il proiettore è spento.

$I_{fondo} =$ _____

B. Previsioni

B1. Si effettuino le seguenti previsioni sul grafico che ci si aspetta di rilevare per $R = R(\alpha)$:

B1.1 L'andamento medio che si prevede per $R = R(\alpha)$ è:
regolare, con molte oscillazioni, con rumore...

B1.2 si prevede un andamento per $R = R(\alpha)$ (scegliere una sola opzione

☐ costante _____

☐ monotono (☐ sempre crescente ☐ sempre decrescente)

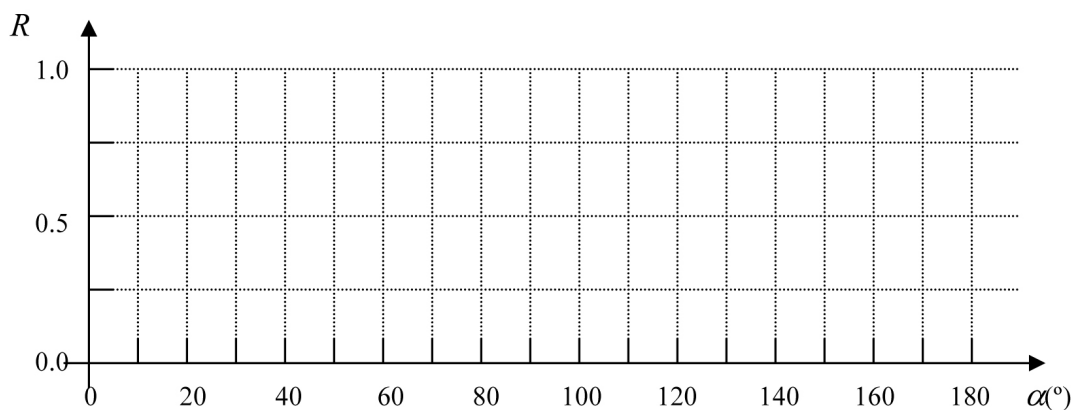
☐ con un massimo

☐ con un minimo

☐ altro (quale?) _____

motivare la risposta: _____

B2. Si rappresenti in tratteggio (- -) nel diagramma sottostante il grafico che si prevede di rilevare per $R = R(\alpha)$



C. Acquisizione

Per ciascun angolo di incidenza della luce si misura l'intensità della luce trasmessa dal polaroid orientato in modo da avere un massimo e un minimo rispettivamente.

Si compilino le prime tre colonne (o si costruisca una analoga tabella su un foglio elettronico).

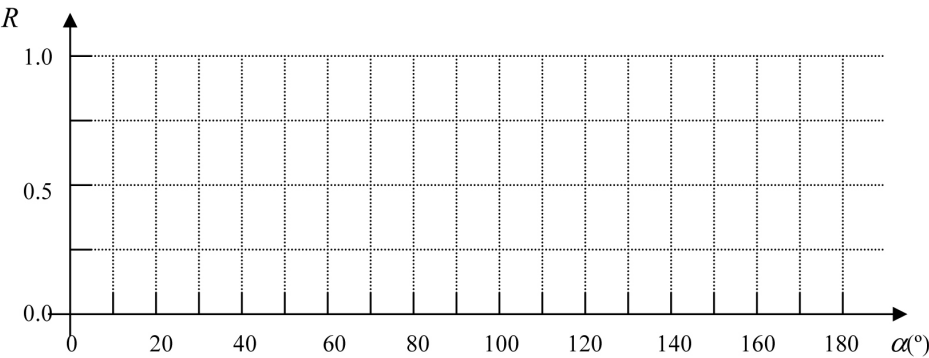
Angolo di incidenza della luce	Intensità della luce trasmessa dal polaroid analizzatore		Grado di polarizzazione
α (°)	Massima (u.a.)	Minima (u.a.)	R

D. Grado di polarizzazione

Con i dati ottenuti si completi la quarta colonna della tabella precedente valutando il grado di polarizzazione definito nel modo seguente:

$$R = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{(I_{\max}/I_{\min}) - 1}{(I_{\max}/I_{\min}) + 1}$$

Si rappresentino i dati riportati della tabella (prima e ultima colonna) nel seguente diagramma (o si costruisca l'analogo grafico con il foglio elettronico).



E. Descrizione e analisi del grafico

E1. Si descriva il grafico ottenuto

--

E2. Per quali valori si ha un massimo di $R=R(\alpha)$? (precisare anche l'indeterminazione)

F. Confronto

Si discutano analogie e differenze tra grafico previsto e grafico osservato

Analogie	Differenze

G. Conclusioni

G1. Riepiloga i risultati ottenuti con questa esperienza

G2. Quale conclusione puoi trarre sulla variazione del grado di polarizzazione R in funzione di α ?

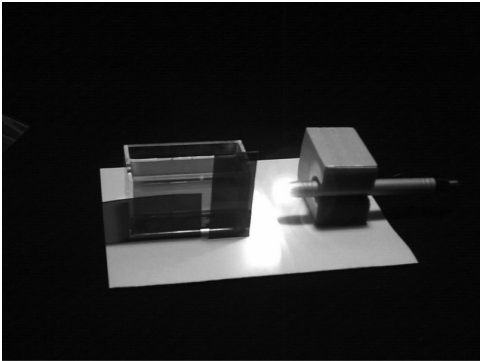
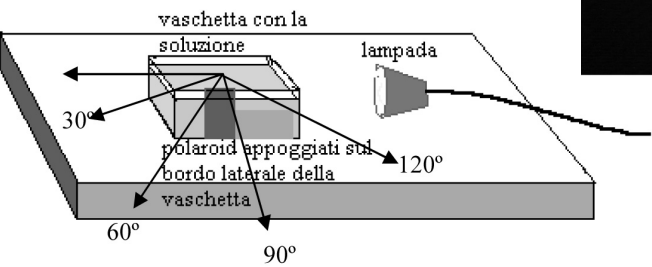
--

Scheda 24 - PolDif1 - La polarizzazione per diffusione della luce

La situazione

Con un polaroid si analizza la luce diffusa in diverse direzioni (in avanti, in avanti lateralmente, perpendicolarmente rispetto alla direzione di incidenza, in dietro lateralmente) da una soluzione salina trasparente.

A. Previsioni



Che cosa si prevede di osservare nei diversi casi proposti?

Situazione Diffusione...	Previsione sulla intensità della luce osservata attraverso l'analizzatore, ruotato intorno alla direzione di osservazione	Previsione sulla polarizzazione della luce
A1....in avanti		
A2....a ~ 30° in avanti		
A3....a ~ 60° in avanti		
A4.... ~ 90°		
A5....a ~ 120° (indietro)		

A6. Previsioni su altri casi che ritieni interessanti esplorare _____

B. Osservazione sperimentale

Si effettua l'esperimento.

Che cosa si osserva nei diversi casi proposti?

Situazione Diffusione...	Osservazione della intensità della luce attraverso l'analizzatore, ruotato intorno alla direzione di osservazione	Conclusione in merito alla polarizzazione della luce
B1... in avanti		
B2... a ~ 30° in avanti		
B3... a ~ 60° in avanti		
B4... ~ 90°		
B5... a ~ 120° (indietro)		

C. Confronto

C1. Discutere analogie e differenze tra i risultati ottenuti sperimentalmente e quelli previsti.

D. Analisi della luce diffusa in direzioni diverse

D1. Per ciascun angolo di incidenza della luce, riepilogare nella tabella le osservazioni relative ai due aspetti indicati:

Situazione Diffusione...	Osservazione sulla differenza tra intensità massima I_{\max} e intensità minima I_{\min} della luce trasmessa dall'analizzatore	Orientazione del polaroid rispetto alla verticale per ottenere un massimo di trasmissione
D1.1... in avanti		
D1.2... a ~ 30° in avanti		
D1.3... a ~ 60° in avanti		
D1.4... ~ 90°		
D1.5... ~ 120°		

D2. Si considerino le osservazioni riportate nella seconda colonna della tabella. La differenza tra intensità massima I_{\max} e intensità minima I_{\min} della luce trasmessa dal polaroid fornisce una indicazione della frazione di luce che risulta polarizzata per diffusione, o in altre parole del *grado di polarizzazione* ($R=(I_{\max}-I_{\min})/(I_{\max}+I_{\min})$).

D2.1 Per i diversi angoli di diffusione, è stato osservato sempre lo stesso grado di polarizzazione della luce diffusa? ☐ Sì ☐ No

Spiegare _____

D2.2 Per quale angolo di diffusione si osserva il maggiore grado di polarizzazione? _____

D3.3 Il grado di polarizzazione della luce diffusa dipende dalla direzione di diffusione?

Spiegare: _____

D3. Si considerino le osservazioni riportate nella terza colonna della tabella.

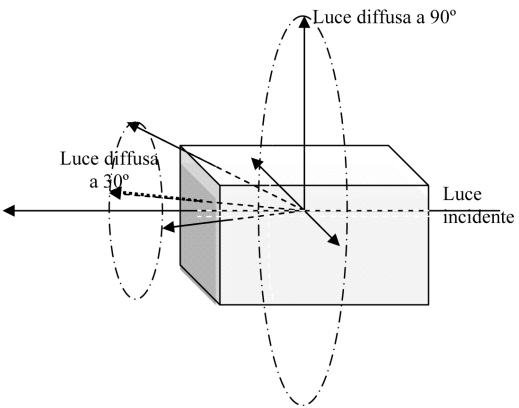
D3.1 Per i diversi angoli di diffusione, come si deve orientare il polaroid per ottenere il massimo di trasmissione? Spiegare

D3.2 Che cosa si può concludere in merito alla polarizzazione della luce diffusa?

D3.3 La polarizzazione della luce diffusa dipende dalla direzione di diffusione? Spiegare

E. Analisi della luce diffusa secondo un fisso angolo

Si effettui ora l'analisi della polarizzazione della luce diffusa in direzioni diverse che formano lo stesso angolo con la direzione della luce incidente (ad esempio:
a 30° in avanti: a sinistra; in alto; a destra; a 90°: a sinistra; in alto; a destra)



E1. Si riportino i risultati ottenuti in merito alla polarizzazione e al grado di polarizzazione della luce diffusa a 30° e a 90° rispettivamente.

Luce diffusa	Polarizzazione	Grado di polarizzazione
30° in basso		
30° a destra		
30° in alto		
90° in basso		
90° a destra		
90° in alto		

E2. Si considerino le osservazioni riportate nella seconda colonna.

E2.1 La luce diffusa a 30° è polarizzata sempre nello stesso modo? _____

Spiegare. _____

E2.2 La luce diffusa a 90° è polarizzata sempre nello stesso modo? _____

Spiegare. _____

E3. Si considerino le osservazioni riportate nella terza colonna.

E3.1 Qual è il grado di polarizzazione della luce diffusa a 30° ? _____

E3.1 Qual è il grado di polarizzazione della luce diffusa a 30° ? _____

E4. In che modo la direzione di incidenza e quella di diffusione (ossia la posizione reciproca della sorgente, del mezzo diffondente, dell'osservatore) determinano:

E4.1 la polarizzazione della luce diffusa? _____

E4.2 il grado di polarizzazione della luce diffusa? _____

F. Conclusioni

In base alle osservazioni effettuate e ai risultati ottenuti si traggano le conclusioni rispondendo alle seguenti domande.

F1. In quali condizioni la luce diffusa risulta polarizzata?

F2. In che modo la direzione di incidenza e quella di diffusione determinano la polarizzazione della luce diffusa?

F3. In che modo la direzione di incidenza e quella di diffusione determinano il grado di polarizzazione della luce diffusa?

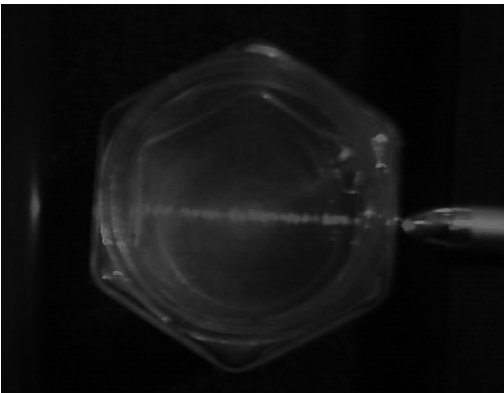
F4. Come spiegheresti (anche con illustrazioni) a un tuo amico le osservazioni effettuate?

Scheda 25 - PolDif2 - Diffusione di luce polarizzata

La situazione

La luce di un puntatore laser incide su una vaschetta contenente una soluzione salina. Si osserva la luce diffusa ortogonalmente (ossia a 90°) rispetto alla direzione di incidenza del fascio laser.

Con un polaroid si analizza la luce diffusa in diverse direzioni sullo stesso piano ortogonale rispetto alla direzione di incidenza della luce.



A. Previsioni

A1. Che cosa si prevede di rilevare osservando ad occhio la luce diffusa nei diversi casi di seguito proposti?

Situazione Diffusione a 90°...	Previsione sulla intensità della luce osservata ad occhio direttamente
A1.1...in alto	
A1.2...a destra	
A1.3...a sinistra	

A2. Che cosa si prevede di rilevare osservando attraverso un polaroid, usato come analizzatore, la luce diffusa nei diversi casi di seguito proposti?

Situazione Diffusione a 90°...	Previsione sulla variazione della intensità della luce osservata attraverso il polaroid ad occhio direttamente	Previsione sulla polarizzazione
A2.1...in alto		
A2.2...a destra		
A2.3...a sinistra		

A3. Motivare le previsioni fatte.

A4. Che cosa cambierebbe se si rotasse il puntatore laser intorno al suo asse?

Spiegare

B. Osservazione sperimentale

Si effettui ora l'esperimento.

B1. Che cosa si rileva osservando ad occhio la luce diffusa nei diversi casi di seguito proposti?

Situazione Diffusione a 90°...	Osservazione diretta dell'intensità della luce diffusa
B1.1... in alto	
B1.2... a destra	
B1.3... a sinistra	

B1.2 Che cosa si rileva osservando la luce diffusa attraverso un polaroid, usato come analizzatore, nei diversi casi di seguito proposti?

Situazione Diffusione a 90°...	Variazione della intensità della luce osservata attraverso il polaroid ad occhio direttamente	Conclusione sulla polarizzazione
A1.1... in alto		
A1.2... a destra		
A1.3... a sinistra		

B1.3 Si osserva la luce diffusa sempre nella stessa direzione ortogonale a quella di incidenza. Che cosa si osserva ruotando il puntatore laser?

C. Confronto

Confrontare il risultato ottenuto sperimentalmente con le previsioni fatte.

C1. Discutere analogie e differenze

C2.1 Alla luce dei risultati ottenuti, sono ancora valide le motivazioni su cui sono state basate le previsioni? ☐ Sì ☐ No

C2.2. Modifiche proposte. _____

D. Analisi

D1. In quale situazione la luce incidente polarizzata viene maggiormente diffusa?

D2. In che modo la direzione e la polarizzazione della luce incidente sono correlate a:

D2.1 direzione di massima diffusione della luce? _____

D2.2 polarizzazione della luce diffusa? _____

D2.3 grado di polarizzazione della luce diffusa? _____

D3. Illustrare la situazione esplorata, in particolare rappresentando la polarizzazione della luce incidente e diffusa con opportuni vettori rispetto a un fissato sistema di riferimento

E. Conclusioni

E1. Quali sono le condizioni per cui si osserva maggiore diffusione della luce incidente polarizzata?

E2. In che modo la direzione e la polarizzazione della luce incidente e quella della luce diffusa sono correlate:

- alla diversa intensità della luce diffusa

- alla polarizzazione della luce diffusa

- al diverso grado di polarizzazione della luce diffusa?

E3. Confrontare i risultati relativi alla polarizzazione della luce diffusa, ottenuti con la scheda PolDif1, e quelli sulla diffusione di luce polarizzata, ottenuti nella presente scheda.

Che cosa si può concludere da tale confronto?

E4. Si riassumano i risultati ottenuti in forma di conclusioni.

Scheda 26 - Cristal - L'analisi di un cristallo/minerale con luce polarizzata

Parte 1 – Il cristallo birifrangente

a) Si riguarda una sorgente di luce attraverso un cristallo birifrangente che viene ruotato intorno alla direzione di osservazione; b) Per una fissata posizione del cristallo si analizza la luce da esso trasmessa con un polaroid; c) Si riguarda una sorgente luminosa (una torcetta elettrica, una lampada accesa), attraverso due polaroid incrociati in mezzo ai quali si trova un cristallo birifrangente, che viene ruotato intorno alla direzione di osservazione.

Si rilevano gli eventuali cambiamenti nella luce trasmessa nei diversi casi.

A. Previsioni

A1. Ci si aspetta che cambi l'intensità della luce osservata:

- a) attraverso il cristallo birifrangente ruotato?

☐Sì☐No
- b) attraverso il cristallo+l'analizzatore mentre viene ruotato?

☐Sì☐No
- c) attraverso i polaroid incrociati con in mezzo il cristallo, che viene ruotato?

☐Sì☐No

A2. Motivare le previsioni effettuate _____

B. Osservazione sperimentale

Effettuare ora gli esperimenti.

B1. Cambia l'intensità della luce osservata:

- a) attraverso il cristallo birifrangente ruotato?

☐Sì☐No
- b) attraverso il cristallo+l'analizzatore mentre viene ruotato?

☐Sì☐No
- c) attraverso i polaroid incrociati con in mezzo il cristallo, che viene ruotato?

☐Sì☐No

B2. Illustrare e descrivere le osservazioni fatte nei tre casi.

Illustrazione del caso a)	Illustrazione del caso b)	Illustrazione del caso c)
Descrizione del caso a)	Descrizione del caso b)	Descrizione del caso c)

B3. Si cambia il punto di osservazione, spostando leggermente la testa. Cambia l'intensità della luce trasmessa? ☐ Sì ☐ No

B3.1 Descrivere ciò che si osserva _____

B3.2 Come si può spiegare? _____

C. Confronto

Confrontare il risultato ottenuto sperimentalmente con le previsioni fatte.

C1. Discutere analogie e differenze

C2.1. In seguito alle osservazioni fatte, si ritengono ancora valide le motivazioni su cui sono basate le previsioni? ☐ Sì ☐ No

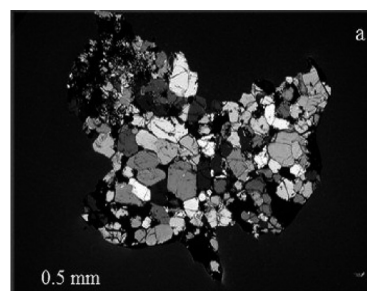
C2.2 Eventuali modifiche? _____

D. Conclusione

D1. Sintetizzare in forma di conclusioni le osservazioni relative alla prima parte (cristallo birifrangente).

Parte 2. La pietra dura

Si rilevano gli eventuali cambiamenti nella luce trasmessa nei seguenti casi: a) Si riguarda una sorgente di luce (una torcetta elettrica, una lampada accesa) attraverso una pietra dura traslucida (o un opale) che viene ruotato intorno alla direzione di osservazione; b) Per una fissata posizione della pietra dura si analizza la luce da esso trasmessa con un polaroid che viene ruotato; c) Si riguarda la sorgente luminosa attraverso due polaroid incrociati con in mezzo una pietra dura, che viene ruotata.



A. Previsioni

A1. Ci si aspetta che cambi l'intensità della luce osservata:

a) attraverso la pietra mentre viene ruotata?

☐ Sì ☐ No

b) attraverso la pietra +l'analizzatore mentre viene ruotato?

☐ Sì ☐ No

c) attraverso i polaroid incrociati con in mezzo la pietra, che viene ruotata?

☐ Sì ☐ No

A2. Motivare le previsioni effettuate _____

B. Osservazione sperimentale

Effettuare ora gli esperimenti.

B1. Cambia l'intensità della luce osservata:

- a) attraverso la pietra mentre viene ruotata?

☐ Sì☐ No
- b) attraverso la pietra+l'analizzatore che viene ruotato?

☐ Sì☐ No
- c) attraverso i polaroid incrociati con in mezzo la pietra, che viene ruotata?

☐ Sì☐ No

B2. Illustrare e descrivere le osservazioni fatte nei tre casi.

Illustrazione del caso a)	Illustrazione del caso b)	Illustrazione del caso c)
Descrizione del caso a)	Descrizione del caso b)	Descrizione del caso c)

B3. Si cambia il punto di osservazione, spostando leggermente la testa.

☐ Sì☐ No

B3.1 Cambia la luce trasmessa?

B3.2 Descrivere ciò che si osserva _____

B3.3 Come lo si può spiegare? _____

C. Confronto

Confrontare il risultato ottenuto sperimentalmente con le previsioni fatte.

C1. Discutere analogie e differenze

C2. Sono ancora valide le motivazioni delle previsioni?

☐ Sì☐ No

C2.1 Eventuali modifiche _____

D. Confronto tra casi.

D1. Confrontare le osservazioni fatte con i polaroid incrociati con: il cristallo birifrangente; la pietra dura

Discutere analogie e differenze.

D1.1 Analogie	D1.2 Differenze

D2. Il fenomeno della birifrangenza entra in gioco nel determinare quello che si osserva con la pietra dura? ☐ Si ☐ No

D2.1 Eventualmente in che modo? _____

D3. Quali altri fenomeni possano entrare in gioco nel determinare le osservazioni fatte? Spiegarne il motivo?

Fenomeno	motivazione

E. Conclusioni

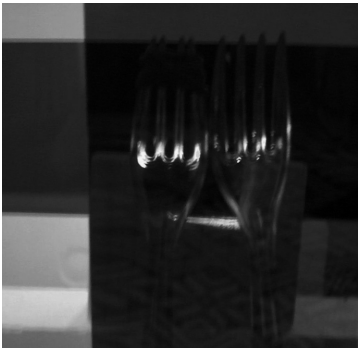
E1. Riassumere i risultati ottenuti in forma di conclusioni.

Scheda 27 - Sforzi - L'analisi degli sforzi in luce polarizzata

Le situazioni

Si considerano le seguenti situazioni: a) Si riguarda una sorgente di luce (una torcetta elettrica, una lampada accesa) attraverso una forchetta di plastica trasparente che viene ruotata intorno alla direzione di osservazione; b) Per una fissata posizione della forchetta si analizza con un polaroid (analizzatore) la luce da essa trasmessa; c) Si riguarda la sorgente luminosa, attraverso due polaroid incrociati tra i quali viene posta e quindi ruotata forchetta.

Si rilevano gli eventuali cambiamenti nella luce trasmessa.



A. Previsioni

A1.1 Ci si aspetta che cambi l'intensità della luce osservata attraverso:

- la forchetta mentre viene ruotata? ☐ Sì ☐ No
- la forchetta+l'analizzatore che viene ruotato? ☐ Sì ☐ No
- i due polaroid incrociati con in mezzo la forchetta, che viene ruotata? ☐ Sì ☐ No

A1.2 spiegare _____

A2. Motivare le previsioni effettuate _____

B. Osservazione sperimentale

Effettuare ora l'esperimento.

B1.1 Cambiare l'intensità della luce osservata attraverso:

- a) la forchetta mentre viene ruotata? ☐ Sì ☐ No
- b) la forchetta+l'analizzatore mentre viene ruotato? ☐ Sì ☐ No
- c) i due polaroid incrociati con in mezzo la forchetta, che viene ruotata? ☐ Sì ☐ No

B1.2 La luce trasmessa dalla sola forchetta risulta polarizzata? ☐ Sì ☐ No

Motivare la risposta _____

B3. Descrivere e illustrare cosa si osserva nei tre casi considerati

B3.1a Descrizione del caso a)	B3.1b Descrizione del caso b)	B3.1c Descrizione del caso c)
B.3.2a Illustrazione del caso a)	B.3.2b Illustrazione del caso b)	B.3.2c Illustrazione del caso c)

B4. Si deforma la forchetta.

B4.1 Cambia l'intensità della luce trasmessa?

☐ Sì ☐ No

B4.2 Descrivere e illustrare che cosa si osserva deformando la forchetta

Descrizione	Illustrazione

B5. Si cambia il punto di osservazione, spostando leggermente la testa.

B5.1 Cambia la luce trasmessa spostando

☐ Sì ☐ No

B5.2 Descrivere ciò che si osserva _____

B5.3 Come lo si può spiegare? _____

C. Confronto

Confrontare il risultato ottenuto sperimentalmente con le previsioni fatte.

C1. Discutere analogie e differenze

C2. Cambieresti le motivazioni che ti hanno portato alle tue previsioni?

☐ Sì ☐ No

C2.1 Eventualmente in che modo? _____

D. Conclusioni

D1. Che cosa si può concludere sulla polarizzazione della luce trasmessa dalla forchetta di plastica?

D2. Riassumere i risultati ottenuti in forma di conclusioni.

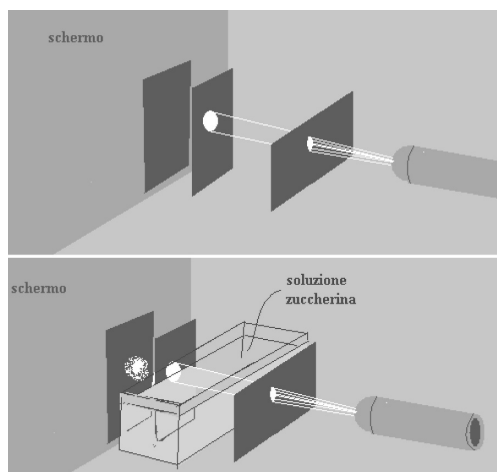
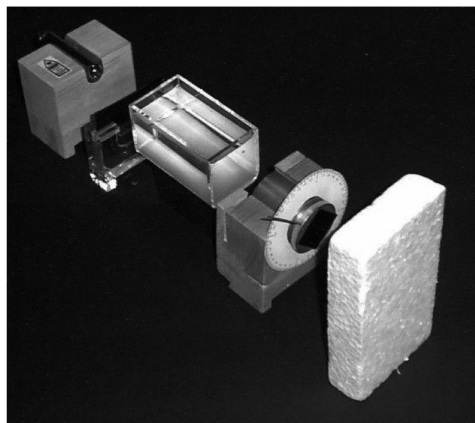
Scheda 28 - PotRot – Mezzi otticamente attivi

Attività A.

Riconoscere i mezzi otticamente attivi.

Si dispone un puntatore laser ad una distanza di circa 1,5 m da uno schermo. Si intercetta il fascio laser con un primo polaroid orientato in modo da avere un massimo di trasmissione e un secondo polaroid incrociato rispetto al primo (si ha un minimo di trasmissione). Fra i due filtri si inserisce una vaschetta che viene riempita con soluzioni zuccherine di concentrazione fissata.

Nei diversi casi si osserva la macchia formata dalla luce trasmessa dai due polaroid con in mezzo la vaschetta.



Attenzione: non osservare mai direttamente il fascio laser, nè i fasci riflessi da superfici riflettenti.

N.B. Le soluzioni zuccherine devono essere sufficientemente omogenee e si deve ottenere una buona dissoluzione del soluto.

A. Previsioni.

A1 Nella vaschetta inizialmente c'è solo acqua.

Si prevede di osservare ancora un minimo di trasmissione?

☐ Sì ☐ No

A2. Nella vaschetta si pone una soluzione di acqua e zucchero con concentrazione definita.

A2.1 Si prevede di osservare ancora un minimo di trasmissione??

☐ Sì ☐ No

A2.2 Come si dovrebbe operare con il secondo polaroid per riottenere un minimo di trasmissione?

A3. Nella vaschetta di pone una soluzione di acqua e fruttosio con concentrazione definita.

A3.1 Si prevede di osservare ancora un minimo di trasmissione? ☐ Sì ☐ No

A3.2 Come si dovrebbe operare con il secondo polaroid per riottenere un minimo di trasmissione?

A4. In base a quali ipotesi sono state formulate le previsioni? _____

B. Esperimento

Si effettua ora l'esperimento. Nei diversi casi proposti si osserva sullo schermo la macchia formata dalla luce trasmessa dai due polaroid con in mezzo la vaschetta, facendo sempre attenzione a non intercettare direttamente con gli occhi il fascio laser.

B1. Acqua. Nella vaschetta si versa inizialmente solo dell'acqua distillata.

Si osserva ancora un minimo di trasmissione? _____

B2 Acqua e zucchero. Si inserisce nella vaschetta una soluzione di acqua e zucchero.

B2.1 Si osserva ancora un minimo di luce trasmessa? _____

B2.2 Che cosa si osserva, ruotando il secondo polaroid, in senso orario/antiorario?

(NB. Il verso orario e antiorario è definito guardando nel verso di propagazione della luce, cioè ponendosi dietro al puntatore laser e guardando verso lo schermo)

L'intensità della luce trasmessa dal secondo polaroid, per una sua rotazione in senso...	
... orario anti-orario
<input type="checkbox"/> aumenta <input type="checkbox"/> resta uguale <input type="checkbox"/> diminuisce	<input type="checkbox"/> aumenta <input type="checkbox"/> resta uguale <input type="checkbox"/> diminuisce

B3. Acqua e fruttosio. Fra i due filtri viene posta la vaschetta piena di una soluzione di acqua e fruttosio.

B3.1 Si osserva ancora un minimo di luce trasmessa? _____

B3.2 Che cosa si osserva, ruotando il secondo polaroid, in senso orario/antiorario?

L'intensità della luce trasmessa dal secondo polaroid, per una sua rotazione in senso...	
... orario anti-orario
<input type="checkbox"/> aumenta <input type="checkbox"/> resta uguale <input type="checkbox"/> diminuisce	<input type="checkbox"/> aumenta <input type="checkbox"/> resta uguale <input type="checkbox"/> diminuisce

C. Confronti

C1. Confrontare le previsioni formulate, con le osservazioni effettuate sperimentalmente.

C1.1 Discutere le analogie	C1.2 Discutere le differenze

C1.3 In base alle osservazioni effettuate, si può dire che sono ancora valide le ipotesi su cui sono state formulate le previsioni? ☐ Sì ☐ No

Eventuali modifiche proposte _____

C2. Confrontare le osservazioni effettuate con la soluzione di acqua e zucchero e la soluzione di acqua e fruttosio.

C2.1 Discutere le analogie	C2.1 Discutere le differenze

D. Conclusioni

D1. Quali conclusioni si possono trarre dalle osservazioni proposte in questa prima attività?

Attività 2. Attività ottica e concentrazione

Si dispone un puntatore laser ad una distanza di circa 1,5 m da uno schermo. Si intercetta il fascio laser con due polaroid disposti ortogonalmente. Si inserisce tra i due polaroid una vaschetta contenente una soluzione di acqua e zucchero con concentrazione crescente, ottenuta versando in una fissata quantità d'acqua (150 g) rispettivamente: 1 cucchiaino di zucchero (fruttosio); 2 cucchiaini di zucchero (fruttosio); 3 cucchiaini di zucchero (fruttosio).

A. Previsioni.

A1. Si aumenta la concentrazione della soluzione nella vaschetta posta tra due polaroid incrociati.

A1.1 Ci si aspetta che cambi l'angolo di cui devi ruotare il secondo polaroid, per riottenere un minimo di trasmissione? ☐ Sì ☐ No

A1.2 Si espliciti la risposta e la si motivi _____

B. Esplorazione qualitativa

Si effettua ora l'esplorazione.

B1. Per riottenere un minimo di trasmissione nei tre casi proposti, di che angolo α bisogna ruotare il secondo polaroid?

B1.1 Acqua + 1 cucchiaino di zucchero	B1.2 Acqua + 2 cucchiaini di zucchero	B1.3 Acqua + 3 cucchiaini di zucchero
$\alpha_1 =$	$\alpha_2 =$	$\alpha_3 =$

B2.1 Si rilevano differenze significative nei tre casi?

☐ Sì ☐ No

B2.2 Spiegare _____

B1.4 Dalle misure effettuate, quale ipotesi si può fare sulla dipendenza di α da c ?

C1. Confrontare le previsioni formulate, con le osservazioni effettuate sperimentalmente.

C1.1 Discutere le analogie	C1.2 Discutere le differenze

D. Un altro caso

Si ripetano le esplorazioni utilizzando il fruttosio, invece dello zucchero.

D1. Si riportino i valori β , degli angoli di cui si deve ruotare il secondo polaroid per riottenere un minimo di trasmissione nei tre casi

D1.1 Acqua + 1 cucchiaino di fruttosio	D1.2 Acqua + 2 cucchiaini di fruttosio	D1.3 Acqua + 3 cucchiaini di fruttosio
$\beta_1 =$	$\beta_2 =$	$\beta_3 =$

D1.4 Dalle misure effettuate, quale ipotesi si può fare sulla dipendenza di β da c ?

D1.5 Si confrontino i due casi della soluzione di acqua e zucchero e quella dell'acqua e fruttosio.

D1.1 Discutere le analogie	D1.2 Discutere le differenze

E. Conclusioni

E1. Quali conclusioni si possono trarre dalle osservazioni proposte in questa seconda attività?

Attività 3 - Potere rotatorio

Per effettuare una misura quantitativa della dipendenza dell'angolo α , di cui si ruota il secondo polaroid per riottenere un minimo di trasmissione, dalla concentrazione c di una soluzione zuccherina, si può procedere in uno dei seguenti modi: M1 – Per diverse concentrazioni c , si misura l'angolo α ; M1 – Per fissati valori di α , si aumenta la concentrazione c fino a riottenere un minimo di trasmissione.

- In ogni caso è necessario mescolare bene le soluzioni e attendere comunque qualche minuto affinché si disciolga la maggior parte dello zucchero (una soluzione effettivamente omogenea è difficile da ottenere a temperatura ambiente e in ogni caso i prodotti commerciali contengono sempre molte impurezze che possono influenzare in modo decisivo la misura)
- Per la determinazione del minimo di trasmissione si può sostituire lo schermo con un sensore di luce. Dal grafico che si osserva in tempo reale diventa semplice e molto precisa la determinazione del minimo di trasmissione e quindi dell'angolo α di cui bisogna ruotare il secondo polaroid per ottenerlo.

A1. Indicare il metodo prescelto: ☐ M1 ☐ M2

A1.1. Motivare la scelta fatta _____

B. Esperimento

B1. Si effettua l'esperimento. Si riportano i valori misurati di α (espresso in $^\circ$) e della concentrazione c della soluzione (espressa in grammi di soluto/cm³ di solvente) nelle prime due colonne della tabella (nella prima colonna di riportano i valori della variabile indipendente e nella seconda colonna quelli della variabile dipendente, scelte in base al metodo prescelto).

		α/c ()

C. Elaborazione dati

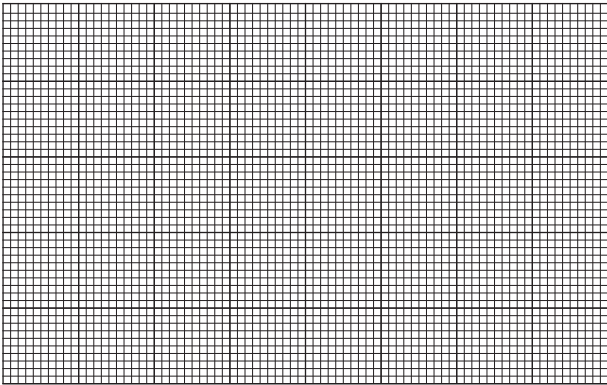
C1.1 Per ciascuna coppia di dati misurati si valuti il rapporto: α/c .

C1.2 I valori ottenuti per tale rapporto si possono considerare costanti? Spiegare.

C2.1 Sulla carta millimetrata riportata a lato, si costruisca il grafico dei dati ottenuti per α e c .

In alternativa si importino i dati in un foglio elettronico e si costruisca il grafico di dispersione. Si alleggi una stampa di tale grafico alla presente scheda.

C2.2 Che tipo di relazione si può ipotizzare che sussista tra le variabili α e c ?



C3. Si tracci la retta che meglio interpola i dati sperimentali. Si ricavi il corrispondente valore del rapporto a/c e lo si riporti qui:

$a/c =$ _____

C4. Dopo aver misurato la lunghezza L del cammino percorso dalla luce all'interno della soluzione zuccherina, si valuti il potere rotatorio specifico $[\alpha]$ della soluzione, specificando la temperatura T a cui è stata effettuata la misura e la lunghezza d'onda λ della luce utilizzata:

$[\alpha] = (\alpha/L \cdot c) =$ _____ ($T =$ _____; $\lambda =$ _____).

C5. Si confronti il valore ottenuto sperimentalmente con quello tabulato in un testo di fisica sperimentale (per una soluzione di acqua e zucchero $[\alpha] = 66.5 \text{ } ^\circ\text{C dm}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3$, a $T = 22^\circ\text{C}$ e $\lambda = 0.5893 \text{ }\mu\text{m}$). Si discuta la consistenza del valore ottenuto con quello tabulato.

D. Confronto

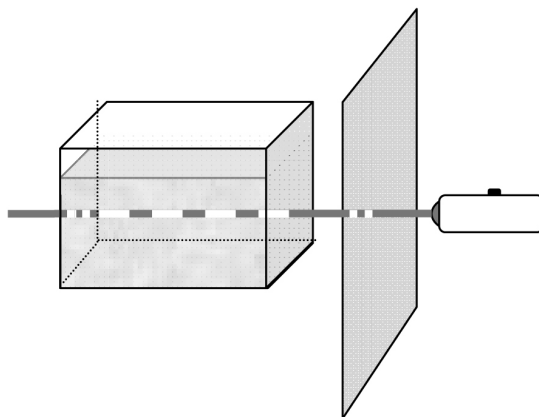
D1. Si confronti il risultato ottenuto sperimentalmente con la previsione effettuata al punto B1.4 dell'attività precedente (attività 2). Discutere analogie e differenze.

analogie	differenze

E. Rappresentazione

E1. Si rappresentino, nella figura accanto, i vettori che rappresentano la polarizzazione della luce incidente e trasmessa dalla soluzione zuccherina.

E2. Qual è l'effetto della soluzione zuccherina sulla polarizzazione del fascio di luce che l'attraversa?



F. Conclusioni

F1 Riepilogare i risultati ottenuti in forma di conclusioni



Università di Udine - Unità di Ricerca in Didattica della Fisica

Questionario Scuola/Classe _____

Cognome _____ Nome _____ Data _____

Questionario sulla polarizzazione

1. Si riportino tre situazioni della quotidianità in cui è coinvolta luce polarizzata (linearmente). Per ciascuna situazione si descriva come si può controllare la polarizzazione della luce.

Situazione	Modalità con cui si controlla la polarizzazione della luce

2. Si consideri una ordinaria sorgente luminosa, come le lampade a filamento o i tubi al neon.

La luce da essa prodotta è:

☐ polarizzata ☐ non-polarizzata

Come ci se ne può accorgere? _____

3. Si osserva un albero guardando attraverso due polaroid sovrapposti. In che modo bisogna disporre i polaroid affinché:

3.1. si osservi l'albero con la massima intensità? _____

3.2. non si riesca a vedere l'albero? _____

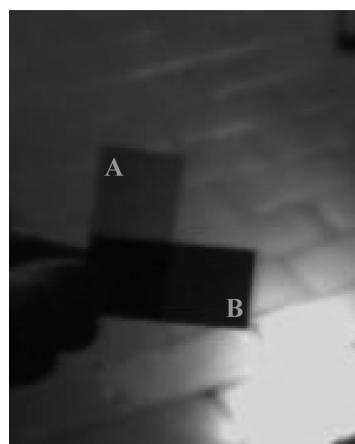
3.3. come si passa da una situazione all'altra? _____

4. A volte i fotografi inseriscono dei filtri polarizzatori davanti all'obiettivo della propria macchina fotografica.

Quale inconveniente evitano in questo modo?

5. Nella foto a destra la luce riflessa la pavimento viene osservata attraverso un polaroid verticale (A in figura) e uno orizzontale (B in figura).

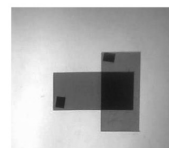
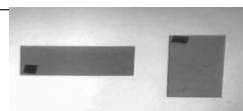
5.1. Descrivi che cosa si osserva nei due casi.



5.2. Come puoi spiegare le differenze che si osservano?

6. Un polaroid è appoggiato sulla lavagna luminosa. Confronta la luce trasmessa dal polaroid e quella che incide su di esso.

Per quali proprietà differiscono?



7. Due polaroid sono sovrapposti uno sull'altro e posti su una lavagna luminosa.

Da quali fattori dipende l'intensità della luce trasmessa dai due polaroid?

8. Quali grandezze è necessario misurare per analizzare quantitativamente come la luce interagisce con due polaroid?

9. Come varia l'intensità della luce trasmessa con l'aumentare del numero di polaroid paralleli sovrapposti? _____

10. L'intensità della luce trasmessa da un filtro rifrangente, come ad esempio una lamina di vetro o di plexiglas, è inferiore di quella della luce che incide normalmente sul filtro stesso.
Quali processi e quali fattori determinano la minore intensità della luce trasmessa, rispetto a quella della luce incidente? (selezionare tutti quelli che si ritiene entrino in gioco)

Processi	Fattori
<input type="checkbox"/> Riflessione	<input type="checkbox"/> spessore del filtro
<input type="checkbox"/> Assorbimento	<input type="checkbox"/> materiale di cui è fatto il filtro
<input type="checkbox"/> Diffusione	<input type="checkbox"/> orientazione del filtro nel piano ortogonale alla direzione di incidenza della luce
<input type="checkbox"/> Polarizzazione	<input type="checkbox"/> polarizzazione della luce incidente
<input type="checkbox"/> Interferenza	<input type="checkbox"/> estensione superficiale del filtro
<input type="checkbox"/> Diffrazione	<input type="checkbox"/> estensione superficiale del filtro

11. L'intensità della luce trasmessa da un polaroid è inferiore di quella della luce che incide normalmente sul polaroid stesso.
Quali processi e quali fattori determinano la minore intensità della luce trasmessa, rispetto a quella della luce incidente? (selezionare tutti quelli che si ritiene entrino in gioco)

Processi	Fattori
<input type="checkbox"/> Riflessione	<input type="checkbox"/> spessore del polaroid
<input type="checkbox"/> Assorbimento	<input type="checkbox"/> materiale di cui è fatto il polaroid
<input type="checkbox"/> Diffusione	<input type="checkbox"/> orientazione del polaroid nel piano ortogonale alla direzione di incidenza della luce
<input type="checkbox"/> Polarizzazione	<input type="checkbox"/> polarizzazione della luce incidente
<input type="checkbox"/> Interferenza	<input type="checkbox"/> estensione superficiale del polaroid
<input type="checkbox"/> Diffrazione	<input type="checkbox"/> estensione superficiale del polaroid

12. Il fascio di luce trasmesso da un primo polaroid incide su un secondo polaroid.
12.1. Si riporti la legge fenomenologica che descrive l'intensità della luce trasmessa dal secondo dei due polaroid.

12.2. Si discuta il significato fisico dei diversi fattori

13. Un fascio di luce rossa viene polarizzato linearmente da un filtro polaroid nella direzione verticale V. Esso incide su un secondo polaroid con coefficiente di trasmissione $T=0,7$. Prevedere il rapporto I_t/I_o tra l'intensità della luce trasmessa I_t e l'intensità della luce incidente I_o , per ciascuno dei seguenti angoli θ di cui si ruota il secondo polaroid a partire da $\theta=0$, situazione per cui si ha un massimo di trasmissione.

θ	I_t/I_o				
0°	0,500	0,525	0,700	0,850	1,000
30°	0,350	0,500	0,525	0,700	0,850
45°	0,250	0,350	0,500	0,525	0,700
60°	0,175	0,250	0,350	0,500	0,525
90°	0	0,175	0,250	0,350	0,500

14. Si allineano tre polaroid ideali F1, F2 ed F3, con un fascio laser di intensità I_o . Qual è l'intensità della luce trasmessa da ciascuno dei polaroid nei diversi casi. Completare la tabella 2.

polarizzazione del fascio incidente	Orientazione del lato lungo del polaroid (V: verticale; H: orizzontale; 45°: a 45°) F1 F2 F3			Intensità della luce trasmessa da F1 F2 F3		
V	45°	V	V			
V	45°	H	H			
V	45°	H	45°			
V	45°	V	45°			
H	45°	V	V			
H	45°	H	H			
45°	H	V	45°			
45°	V	45°	H			

15. Quali aspetti caratterizzano la polarizzazione della luce trasmessa da un polaroid?

15.1. È una proprietà: ☐ scalare ☐ vettoriale

15.2. È una proprietà che:

- ☐ dipende dall'intensità della luce incidente
- ☐ non-dipende dall'intensità della luce incidente

15.3. È una proprietà che si manifesta

- ☐ nella stessa direzione della direzione in cui si propaga la luce
- ☐ in direzione ortogonale alla direzione in cui si propaga la luce

16. Un polaroid intercetta perpendicolarmente un fascio di luce. Il modo in cui polarizza la luce (ossia quale proprietà conferisce alla luce) può essere descritto:

- ☐ individuando la orientazione del polaroid con una direzione perpendicolare alla sua superficie
- ☐ Individuando il polaroid con una direzione parallela alla sua superficie
- ☐ In un altro modo (quale) _____

Spiegare la scelta _____

17. Se più polaroid sono allineati con un fascio luminoso, quando si ha sicuramente un minimo di trasmissione?

- ☐ Quando due polaroid anche non consecutivi sono incrociati
- ☐ Solo quando due polaroid consecutivi sono incrociati
- ☐ altro (specificare) _____

18. Fra due polaroid incrociati si inserisce un terzo polaroid a 45° . L'intensità della luce trasmessa:

- ☐ Resta uguale
- ☐ Cresce
- ☐ Decresce

Spiegare _____

19. Come si comporta un polaroid nell'interazione con la luce?

- ☐ solo come filtro passivo (assorbe semplicemente parte della luce che incide su di esso)
- ☐ solo come un filtro attivo (modifica le proprietà della luce che incide su di esso)
- ☐ sia come filtro attivo, sia come filtro passivo (modifica le proprietà della luce che viene trasmessa e assorbe parte della luce)

Spiegare _____

20. Si appoggia un cristallo di calcite (tipo spato di Islanda) sulla pagina scritta di un libro.

20.1. Quante immagini delle scritte si osservano? _____

20.2. Tali immagini risultano polarizzate? _____

20.3. Come ci se ne può accorgere?



21. Che cosa accade a tali immagini se si ruota il cristallo intorno a una direzione verticale.

22. Illustra le situazioni che si deve realizzare per ottenere una sola immagine trasmessa dal polaroid (il cristallo è visto dall'alto)



23. Un fascio di luce polarizzata linearmente incide su una faccia di un cristallo birifrangente orientato in modo che il fascio ordinario sia polarizzato verticalmente.

23.1. Quanti fasci emergono in genere dal cristallo? _____

23.2. Posta uguale ad uno l'intensità della luce incidente, che intensità ha ciascuno di questi fasci?

23.3. Qual è la loro polarizzazione? _____

23.4. Se il fascio ordinario è polarizzato a 45° , come è polarizzato quello straordinario?

23.5. La polarizzazione del fascio ordinario e quella del fascio straordinario dipendono dalla polarizzazione del fascio incidente? ☐ Sì ☐ No

23.6. L'intensità del fascio ordinario e quella del fascio straordinario dipendono dalla polarizzazione del fascio incidente? ☐ Sì ☐ No

Spiegare: _____

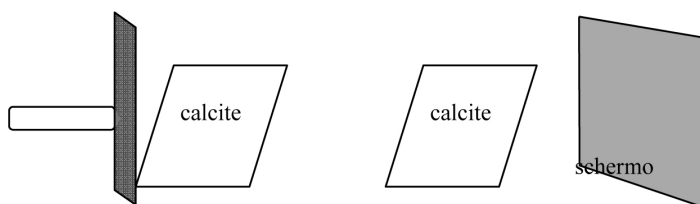
24. Il fascio di luce polarizzata linearmente trasmesso da un polaroid orientato verticalmente (il lato maggiore del polaroid è verticale) incide su una faccia di un cristallo birifrangente. Il fascio ordinario viene trasmesso da un polaroid ruotato di 45° rispetto alla verticale.

Il rapporto tra l'intensità del fascio ordinario e quella del fascio straordinario è uguale a:

☐ 0 ☐ 1/4 ☐ 1/2 ☐ 1 ☐ 2

25. Un fascio laser incide su due cristalli birifrangenti (calcite) allineati con esso e disposti parallelamente uno all'altro come nel disegno.

25.1. Tracciare il cammino dei diversi fasci di luce: quello che incide sul primo cristallo, quelli che vengono trasmessi da ciascuno dei due cristalli e intercettati dallo schermo.

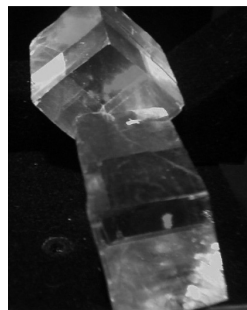


25.2. Rappresentare nel disegno la polarizzazione che ci si aspetta di rilevare per i diversi fasci.

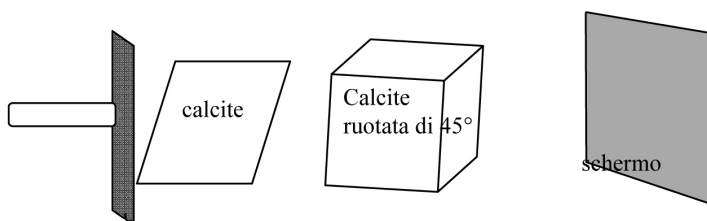
26. Due cristalli di calcite sono allineati, uno di seguito all'altro, con il raggio di un puntatore laser, inizialmente con le facce corrispondenti parallele (cristalli diretti). Il secondo cristallo viene ruotato di 45° intorno alla direzione di propagazione del fascio incidente sul primo cristallo. Con uno schermo si intercettano i fasci emergenti dal secondo cristallo.

26.1. Quanti fasci di luce ci si aspetta di osservare in uscita dal secondo cristallo? _____

26.2. Che polarizzazione ci si aspetta che abbiano? Spiegare _____



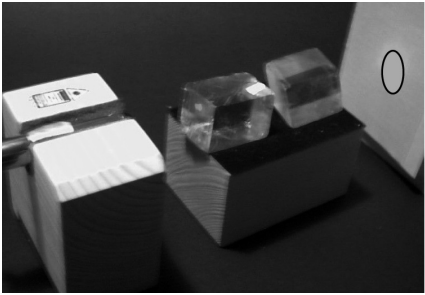
26.3. Tracciare il cammino dei diversi fasci di luce: quello che incide sul primo cristallo; quelli che si propagano tra i due cristalli, quelli emergenti dal secondo cristallo e che vengono intercettati dallo schermo.



26.4. Rappresentare nel disegno la polarizzazione che ci si aspetta di rilevare per i diversi fasci raffigurati.

Spiegare il disegno fatto _____

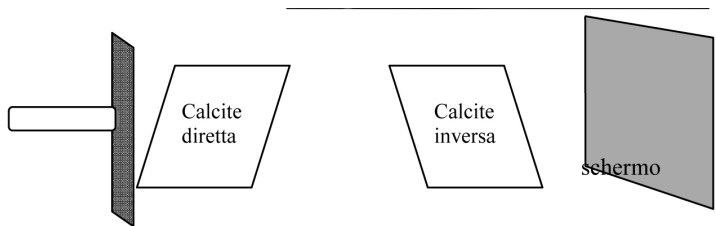
27. Su due cristalli di calcite allineati, uno diretto e uno inverso (ossia disposto in modo da costituire l'immagine speculare del primo),incide il fascio di luce polarizzata di un puntatore laser. Con uno schermo S si intercetta la luce emergente dal secondo cristallo (nella foto un ovale copre la parte illuminata).



27.1. Quanti fasci di luce ci si aspetta di osservare in uscita dal secondo cristallo? _____

27.2. Con che polarizzazione? _____

27.3. Tracciare il cammino dei diversi fasci di luce: quello incidente sul primo cristallo e quelli trasmessi da ciascuno dei cristalli.



27.4. Rappresentare nel disegno la polarizzazione, che si prevede di rilevare per i diversi fasci raffigurati. Spiegare il disegno fatto _____

28. Un cristallo birifrangente è appoggiato su un foglio su cui è disegnato un puntino rosso. Sotto al cristallo e sopra al puntino rosso viene inserito un polaroid. Si ruota il cristallo lasciandolo sempre appoggiato sul polaroid e mantenendo quest'ultimo fermo.

28.1. Cambiano le intensità delle immagini del puntino rosso, ruotando il cristallo?

☐ Sì ☐ No

28.2. Vi saranno delle posizioni in cui si osserverà una sola immagine?

No.	Motivazione
Sì. Quali? _____	Motivazione

28.4. Vi saranno delle posizioni in cui si osserveranno entrambe le immagini del puntino con la stessa intensità?

No.	Motivazione
Sì. Quali? _____	Motivazione

